

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**INOVACE OZVUČNÍKU KLARINETU POMOCÍ
BESSELOVÝCH FUNKCÍ**

THE INNOVATION OF CLARINET BELL USING BESSEL FUNCTIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Kudělka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Josef Kudělka

ID: 192422

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Inovace ozvučnicku klarinetu pomocí Besselových funkcí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte nejméně 2 ozvučnický (boltce, korpusy) klarinetu. Nejprve mechanicky i spektrálně změřte nástroj bez ozvučnicku a s továrním ozvučnickem. Určete, která frekvenční pásma by mohl nový radiátor posílit, aby rozšířil barvu nástroje. Poté vytvořte na základě Besselových křivek návrh nejméně 2 nových ozvučnicků – vlnovodů s odlišným vnitřním exponenciálním rozpětím. Vyrobte je ze dřeva nebo umělého materiálu (např. z 3D tiskárny). Pozornost věnujte hustotě a mechanickým vlastnostem nového materiálu. Poté proveďte spektrální a směrovou analýzu a porovnejte a vyhodnoťte všechny typy boltců – původního a nových.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] Clarinet acoustics. Music Science at UNSW [online]. Australia: The University of New South Wales, 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html>

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje porovnání vlivu klarinetových ozvučníků na jeho výsledné spektrum a směrovou charakteristiku. Porovnává originální ozvučník s vlastními ozvučnými navrženými pomocí Besselových zvukovodů a vyhotovených z ABS plastu. Dále se zabývá principy vzniku tónu a potřebným teoretickým základem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klarinet, ozvučník, besselovy zvukovody, spektrální analýza.

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on the comparison of the influence of clarinet bells on its final spectrum and directional characteristics. It compares the original bell with other bells designed using Bessel sound pipes and made of ABS plastic. It also investigates the principles of tone formation and the necessary theoretical basis.

KEYWORDS

Clarinet, bell, Bessel horns, spectral analysis.

KUDĚLKA, Josef. *Inovace ozvučníku klarinetu pomocí Besselových funkcí*. Brno, 2019, 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Mga. Mgr. Ondřej Jirásek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Inovace ozvučnicku klarinetu pomocí Besselových funkcí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Mga. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Historický vývoj a konstrukce klarinetu	11
1.1 Historický vývoj klarinetu	11
1.2 Konstrukce klarinetu	12
1.2.1 Klarinet	12
1.2.2 Hubička	13
1.2.3 Plátek a ligatura	14
1.2.4 Soudek, tělo a korpus	16
1.3 Princip vzniku tónu klarinetu	16
1.3.1 Klarinetové rejstříky	19
2 Harmonická analýza signálu	21
2.1 Fourierova transformace	21
2.1.1 Krátkodobá Fourierova transformace	22
2.2 Lineární prediktivní kódování	22
2.3 Harmonická řada	22
2.3.1 Inharmonicity	23
3 Samotné měření	24
3.1 Mechanické měření	24
3.2 Měření směrovosti a spektra	25
3.2.1 Použité zařízení pro měření	26
3.2.2 Vybrané tóny pro měření	26
3.2.3 Prostředí MATLAB pro zpracování naměřených hodnot	27
4 Návrh a konstrukce nového ozvučníku	28
4.1 Měření 3D scannerem ATOS 1	28
4.2 Návrh zvukovodu	29
4.2.1 Aplikace Besselových zvukovodů	29
4.2.2 Samotný návrh	30
4.2.3 Výroba nátrubku	31
5 Výsledky měření	33
5.1 Tón e	33
5.1.1 Zhodnocení výsledků tónu e	33
5.2 Tón f	35
5.2.1 Zhodnocení výsledků tónu f	35

5.3	Tón g	37
5.3.1	Zhodnocení výsledků tónu g	38
5.4	Tón c1	39
5.4.1	Zhodnocení výsledků tónu c1	40
5.5	Tón h1	42
5.5.1	Zhodnocení výsledků tónu h1	42
5.6	Tón c2	43
5.6.1	Zhodnocení výsledků tónu c2	43
5.7	Tón d2	45
5.7.1	Zhodnocení výsledků tónu d2	45
5.8	Tón c3	46
5.8.1	Zhodnocení výsledků tónu c3	47
5.9	Celkové zhodnocení výsledků	48
Závěr		50
Literatura		51
Seznam symbolů, veličin a zkratk		52
Seznam příloh		53
A Přiložené CD		54
B Směrové charakteristiky		55

Seznam obrázků

1.1	Klarinetová hubička, překresleno z [1].	14
1.2	Plátek, pohled shora, překresleno z [1].	15
1.3	Kmity vzdušného sloupce v trubici s jedním koncem uzavřeným, překresleno z [2].	17
1.4	Vliv otevřeného tónového otvoru na rozložení rezonančních módů. Překresleno z [2].	18
1.5	Besselovy zvukovody. Překresleno z [2].	19
3.1	Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučníků	25
4.1	Sken originálního nátrubku Kraslice	28
4.2	Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučníků	29
4.3	Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučníků	30
4.4	Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučníků	31
4.5	Finální výtisky nátrubků	32
4.6	Finální výtisky nátrubků	32
5.1	FFT a LPC tónu e	34
5.2	FFT a LPC tónu f	36
5.3	FFT a LPC tónu g	38
5.4	FFT a LPC tónu c1	40
5.5	FFT a LPC tónu h1	43
5.6	FFT a LPC tónu c2	45
5.7	FFT a LPC tónu d2	47
5.8	FFT a LPC tónu c3	49
B.1	Směrové charakteristiky tónu e	55
B.2	Směrové charakteristiky tónu f	56
B.3	Směrové charakteristiky tónu g	57
B.4	Směrové charakteristiky tónu c1	58
B.5	Směrové charakteristiky tónu h1	59
B.6	Směrové charakteristiky tónu c2	60
B.7	Směrové charakteristiky tónu d2	61
B.8	Směrové charakteristiky tónu c3	62

Seznam tabulek

3.1	Tabulka vnitřních rozměrů ozvučnicku Kraslice	24
3.2	Tabulka vnitřních rozměrů ozvučnicku Special	24
4.1	Tabulka poloměru nátrubku pro $\gamma = 0,3$	31
4.2	Tabulka poloměru nátrubku pro $\gamma = 1,1$	31
5.1	Tabulka spektra tónu e	33
5.2	Tabulka spektra tónu f	35
5.3	Tabulka spektra tónu g	37
5.4	Tabulka spektra tónu c1	39
5.5	Tabulka spektra tónu h1	42
5.6	Tabulka spektra tónu c2	44
5.7	Tabulka spektra tónu d2	46
5.8	Tabulka spektra tónu c3	48

Úvod

Tato studentská práce se věnuje vlivu ozvučnicku klarinetu na jeho výsledné frekvenční spektrum a směrovou charakteristiku. V první kapitole popisuje historii klarinetu a jeho vývoj, dále jsou pak popsány všechny jeho části a jsou přiblíženy fyzikálně-akustické vlastnosti, principy vzniku tónu tohoto nástroje a jeho ovlivňující faktory.

V druhé kapitole je popsána harmonická analýza signálu, rozbor jednotlivých harmonických složek spektra a jejich vliv na výslednou barvu tónu. Dále je popsána metoda spektrální analýzy pomocí Fourierovy transformace, vysvětlen její princip a její zužitkování při zobrazení spektra nástroje.

V třetí kapitole je popsáno samotné měření pěti klarinetových ozvučníků, a to jak mechanické, tak i měření směrovosti a spektra. Je zde popsána metoda měření, použitá technika i její rozmístění, výběr měřených tónů a jejich odůvodnění.

Výsledky tohoto měření jsou sepsány ve čtvrté kapitole, kde se nachází rozbor jednotlivých měřených tónů, vliv připojení ozvučníků a jejich rozdíly.

1 Historický vývoj a konstrukce klarinetu

1.1 Historický vývoj klarinetu

Za první bezprostřední předchůdce klarinetu lze považovat chalumeau. Chalumeau byl jednoplátkovým dřevěným dechovým nástrojem, jehož kořeny sahají až do starověku. Byl vybaven sedmi otvory ke krytí prsty, neoddělitelnou hubičkou od těla nástroje a vedením plátku směrem vzhůru a to tak, že se při hře dotýkal horního rtu hráče. Na následném vývoji tohoto nástroje se výrazně podíleli otec a syn Christophovi, kteří jej zdokonalovali. Přidáním třetí klapky objevili jeho přefukovací schopnost a pokusy s prodlužováním nástrojových trubíc se jim podařilo dosáhnout příjemné barvy tónu. Následovalo postupné přidávání klapek jinými nástrojaři, což umožnilo komplikovanější herní postupy. Pojmenování Clarinet pro tento nástroj bylo pak odvozeno od názvu vysoké barokní trubky clariny, jejíž zvuk měl připomínat.

Díky velkému rozmachu dechové hudby na přelomu 18–19 století byly postupem času na tyto nástroje kladeny čím dál větší technické nároky a hra na dosavadní Lefévruv klarinet se šesti klapkami byla velmi komplikovaná, obzvláště v tóninách s větším počtem posuvek. Chromatickou stupnici bylo možné zahrát pouze pomocí půldírek nebo tzv. vidličkových hmatů.

Velkou revolucí v oblasti konstrukce klarinetu přinesl uznávaný virtuóz Iwan Müller. Ten nejdříve provedl inovaci klapek, kdy pro lepší těsnící vlastnosti zavedl poddajné podušky z vaty, které byly potaženy kůží nebo střívkem a zajišťovaly tak mnohem lepší těsnost než dosud používané proužky kůže či plsti. Následně se ale začal zabývat i samotnou konstrukcí a provedl úplnou chromtizaci nástroje. Toho docílil díky přesnému umístění přefukovací klapky, zjištění vzájemného poměru jednotlivých tónů na nástroji vzhledem k temperovanému ladění a přidáním dalších sedmi klapek. Dále pak definitivně otočil hubičku plátkem směrem dolů, vázání plátku motouzem nahradil kovovým strojkem a zavedl používání plátků se ztenčenou špičkou. Těmito změnami nástroj výrazně přepracoval a položil tak základ tzv. německému systému klarinetu.

Jeden z posledních významných kroků ve vývoji tohoto nástroje udělal Hyacinthe Eléonore Klosé. Ten spolu s nástrojařem Augustem Buffetem přidal další čtyři klapky se šesti pohyblivými prstenci, neboli brýlemi. To mělo za důsledek, že hráč obsluhoval jedním prstem kromě samotné dírky ještě jednu nebo dvě menší dírky a díky tomu odstranil některé další vidličkové hmaty a klouzání malíků. Jelikož tento systém brýlí byl odvozen z Böhmovy flétny, byl tento typ klarinetu nazván Böhmovým. Dnes je tento systém znám jako francouzský systém klarinetu. Tento systém byl později vylepšen přidáním dalších čtyř klapek, čímž vznikl tzv. plnoklapkový systém.

Jak německý tak francouzský systém jsou v mírně obměněné podobě užívané do dnes [3, 4].

1.2 Konstrukce klarinetu

1.2.1 Klarinet

Klarinet je jednoplátkový dřevěný dechový nástroj, který bývá nejčastěji vyroben z ebenového, grenadillového nebo zimostrazového dřeva, v posledních letech se jako levnější alternativa používá i umělá hmota. V základu jde o nástroj válcovitého vrátání, skládající se z celkem pěti konstrukčních částí, a to hubičky, soudku, horního dílu, spodního dílu a korpusu. Další neodmyslitelnou součástí je plátek, který tvoří oscilátor nástroje. Klarinety se dnes v drtivé většině případů vyrábějí podle německého nebo francouzského systému, dále je pak můžeme rozdělit na „plnoklapkové“, které mají 20 klapek a sedm „brýlových kroužků“ a „poloklapkové“, které mají 17 klapek a 6 „brýlových“ kroužků. Délka B klarinetu bývá přibližně 66 cm, ovšem liší se podle ladění, kde rozlišujeme:

- B klarinet – V současné době nejužívanější typ klarinetu, který se uplatní ve všech stylech hudby. Jak název napovídá, je v B ladění, což v praxi znamená, že zní o tón níže, než je zapsaná nota v notovém zápisu.
- A klarinet – Tento klarinet je využíván hlavně v tóninách s více posuvkami v předznamenání, kde by hra na B klarinet byla značně obtížnější. Tato vlastnost je dána konstrukcí klarinetu. Tento klarinet zní o malou tercii níže, než je nota zapsaná v notovém zápisu.
- Es klarinet – Hlavní předností tohoto typu klarinetu je schopnost dosáhnout vyšších tónů než klarinety jiného ladění, toho může být využito například v orchestrech. Zní o malou tercii výše, než je nota zapsaná v notovém
- B Bassklarinet – Klarinet, konstrukčně mírně se odlišující od ostatních typů. Je výrazně delší, korpus i „soudek“, který je zde nahrazen zahnutou trubicí, jsou vyrobeny z kovu. Oproti B klarinetu zní o oktávu níže. Nejčastěji bývá využit v symfonických či dechových orchestrech.

Mezi další, dnes už však výjimečně užívané typy, patří například G klarinet, C klarinet, As klarinet nebo D klarinet [4, 5].

Materiál ze kterého je klarinet vyroben, hraje ve výsledném zvuku velmi podstatnou roli, určuje ale také stabilitu v různých teplotních podmínkách. Z toho důvodu se nejčastěji využívá dřevo ebenové, které je nejstálejší.

1.2.2 Hubička

Hubička je nejsvrchnější část nástroje a hraje velmi důležitou roli v tvorbě a nasazení tónu. Vyrobená může být z různých materiálů, například dřeva, mosazi či jiného kovu, plastu nebo dřeva. Nejčastěji je ale používán ebonit, neboli velmi tvrdá pryž. K hubičce je pomocí ligatury připevněn plátek [1, 6].

Odklon a dráha

Velmi důležitými parametry u hubičky jsou odklon a dráha. Dráha je vzdálenost špičky plátku od tzv. „mrtvého“ bodu, což je místo ve kterém se již plátek nedotýká těla hubičky. Odklon je vzdálenost špičky hubičky od okraje plátku. Tyto dva parametry velmi ovlivňují výsledné nasazení a zvuk a je k nim při výběru hubičky potřeba přihlížet, zároveň tak musíme přihlížet k typu hubičky při výběru plátku [1, 6].

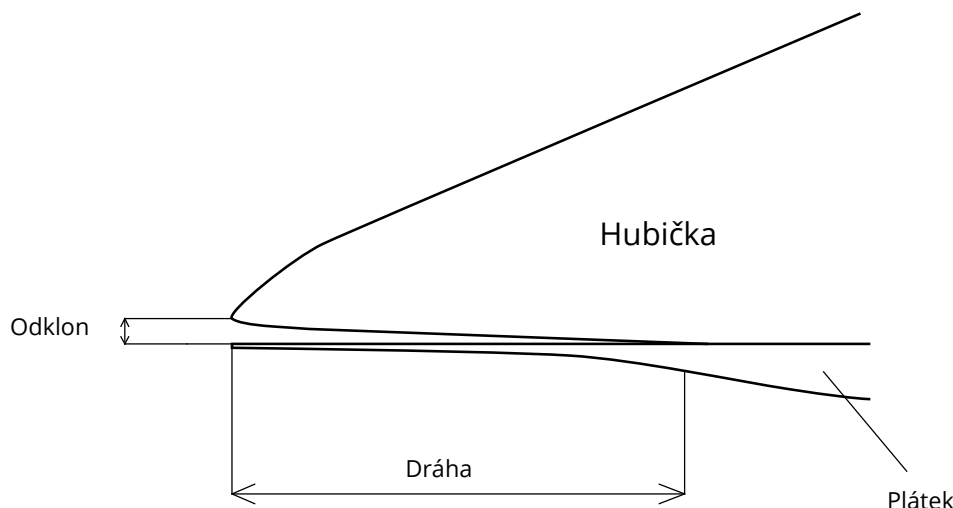
Vztah mezi odklonem a plátkem lze vyjádřit nepřímou úměrou, pokud budeme uvažovat stále stejnou dráhu. Při větším odklonu plátku je třeba počítat s tím, že díky velké vzdálenosti hubičky od špičky plátku se bude plátek rozechvívat obtížněji a bude zapotřebí použít měkčího plátku. Tón bude v tomto případě jasný a velmi otevřený. Naopak při malém odklonu je třeba použít tvrdšího plátku, aby se nám nezavíral. Tato varianta je vhodná pro začínající hráče, kdy se tón nechá pořádně snadno ovlivnit, ozev je snadný a hráč si zvyká na větší tvrdost plátku [1, 6]. Odklony plátků můžeme rozřadit podle vzdálenosti do tří kategorií:

- Hubičky s velkým odklonem - Vzdálenost špičky plátku od hubičky je nad 1,27 mm.
- Hubičky se středním odklonem - Vzdálenost špičky plátku od hubičky je mezi 1,14–1,27 mm.
- Hubičky s malým odklonem - Vzdálenost špičky plátku od hubičky je menší než 1,27 mm.

Podobný vztah platí pro délku dráhy hubičky. Ta se uvádí také v milimetrech a pohybuje se v rozmezí 18–23 mm. Při delší dráze je délka plátku, která se rozechvívá, větší a ozev tónu je tak snazší. Vzniká tak tón temnější, který se dá dobře regulovat tlakem spodního rtu. Při malé dráze hubičky vzniká tón vysoce zvučný, který však nelze tak snadno regulovat. Je vhodný například při hře v orchestru, kde tón snáze prorazí [1, 6]. Dráhu můžeme stejně jako odklon rozdělit do tří kategorií:

- Hubičky s dlouhou dráhou - Vzdálenost špičky plátku od „mrtvého“ bodu je 23–27 mm.

- Hubičky se střední dráhou - Vzdálenost špičky plátku od „mrtvého“ bodu je 20,5–22,5 mm.
- Hubičky s krátkou dráhou - Vzdálenost špičky plátku od „mrtvého“ bodu je 18–20,5 mm.



Obr. 1.1: Klarinetová hubička, překresleno z [1].

1.2.3 Plátek a ligatura

Plátek

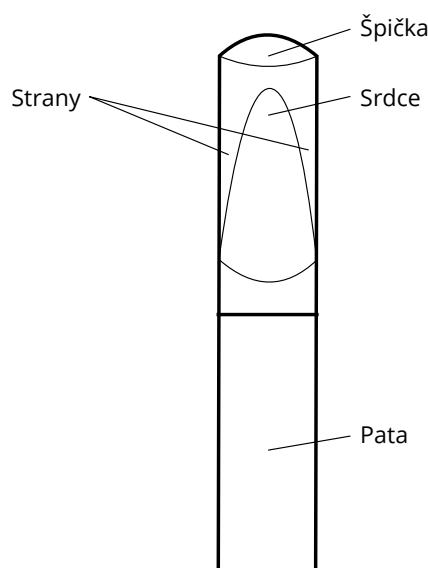
Plátek je z hlediska ovlivnění tónu velmi důležitou součástí nástroje. V případě klarinetu se jedná o jazýček tlumený, což znamená že frekvenci svého kmitání přizpůsobuje vlastnostem rezonátoru. *Vlivem tlaku vzduchu z ústní dutiny se plátek přiblíží k hubičce a otvor se zmenší, nebo uzavře. Díky své pružnosti a rozdílným poměrům tlaku se poté vychýlí na opačnou stranu a cyklus se opakuje, přirozeně v setinách až tisícinách sekundy. Vzduchové nárazy rozvibrují vzduchový sloupec uvnitř nástroje, čímž vzniká tón, jehož výška je závislá na délce vzduchového sloupce [7].*

Na vlastnosti plátku jsou kladeny velmi vysoké nároky, plátek musí být schopen kmitat frekvencí přes 1800 Hz a proto je jeho výroba velmi specifická. Cukrová třtina obecná, která se používá pro jeho výrobu, je pěstována z velké většiny na jednom místě na světě, a tím je oblast Var na jihu Francie. Zde panují ideální podmínky pro tuto rostlinu a proto všichni světoví výrobci mají plantáže právě zde. Výsledná kvalita plátku pak také záleží na klimatických podmínkách daného období a následných vlastnostech dřeva. Celý výrobní proces výroby trvá několik let. Po dvou letech růstu rostlina začne dřevnatět a je připravená pro sklizeň, následuje nasekání na menší části a sušení, poté je nařezána na délku výsledného plátku a seřezána do

stanovených tvarů. Posledním krokem je broušení, kdy plátek získává výsledný tvar. Je důležité aby plátek byl seřezán rovnoměrně, tzn. pokud si vytvoříme uprostřed plátku podélnou osu a zvolíme dva body ležící na její kolmici ve stejné vzdálenosti, měla by změřená tloušťka plátku být stejná. Dalším faktorem je hustota dřeva, která by taktéž měla být v ideálním případě stejná po celém plátku [1].

Jistou alternativou pro dřevěné plátky jsou plátky vyrobené z umělých materiálů. Díky moderním technologiím se těmto plátkům daří zvukově dostat velmi blízko k plátkům dřevěným, avšak jistý rozdíl je zde pořád. Hlavní výhodou těchto plátků je jejich dlouhá životnost a odpadá zde nutnost vlhčení [1].

Plátky, jak již bylo zmíněno v kap. 1.2.2, se vyrábějí v několika tvrdostech, nejčastěji v rozmezí hodnot 1–5 s krokem 0,5, kde 1 značí nejměkčí plátek a 5 nejtvrdší.



Obr. 1.2: Plátek, pohled shora, překresleno z [1].

Ligatura

Ligatura, neboli také strojek, zajišťuje dostatečné přitisknutí paty plátku k hubičce. Dříve se používaly také vázací šňůry, ty jsou ale dnes již pro své vlastnosti nepoužívané - velmi složitý proces upevnění, nedokonalé a nerovnoměrné přitisknutí paty plátku k hubičce. Dnes mohou být vyrobeny z kovu nebo kombinace kovu a kůže, vybaveny jedním nebo dvěma stahovacími šroubky umístěnými na vrchní nebo spodní straně hubičky. Starší modely, vyrobeny z kovu a vybaveny dvěma stahovacími šroubky na spodní straně, z hlediska konstrukce nezajišťují ideální kontakt hubičky s plátkem. Na vině je materiál, který není pružný a tak pokud dokonale nekopíruje tvar hubičky a plátku, není schopen zajistit dokonalé rozložení tlaku.

Dále pak systém stahování dvěma šrouby je náchylný na vyosení, rozdílné přitažení šroubků a případné „přetažení“, které může poškodit patu plátku. Modernější ligatury, vyrobené z kombinace kůže a kovu, zajišťují právě díky pružným vlastnostem kůže a použití jednoho stahovacího šroubku stejnoměrnost přitlaku. [1, 6]

1.2.4 Soudek, tělo a korpus

Soudek

Soudek se nachází mezi tělem a hubičkou a je to v podstatě prodloužení horního dílu s možností měnit jeho délku. Propojen je, stejně jako ostatní části klarinetu, nejčastěji korkovými čepy, v případě levnějších nástrojů pak mohou být nahrazeny gumovými O-kroužky. Povytažením soudku se změní délka celé trubice a tím také ladění, čehož se využívá k doladění při hře s jinými nástroji. Využívají se dva typy soudků, delší a kratší. Kratší se používá při hře ve vyšším ladění nebo pak při hře v chladných prostorách, kde hraje nástroj níže.

Tělo a korpus

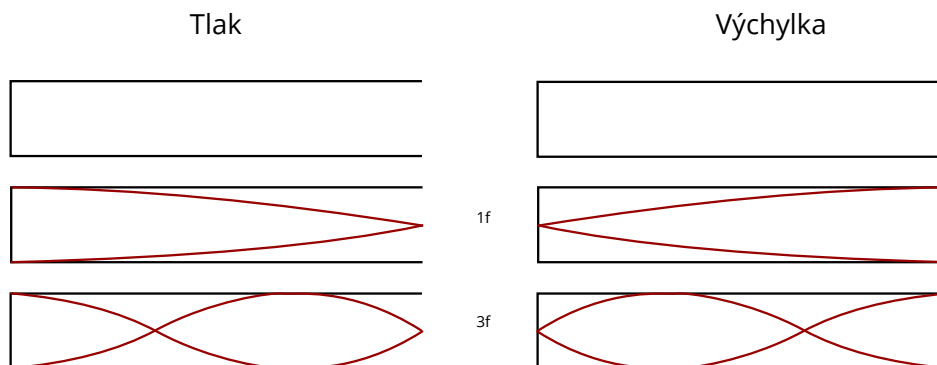
Tělo klarinetu je rozděleno na horní a spodní díl. Jedná se vlastně o dřevěnou trubici válcového vrtání, jejíž průměr se pohybuje okolo 15 mm. Ta je, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.1, vyrobena nejčastěji z ebenového dřeva, vybavena přesně rozmístěnými otvory, které jsou zakrývány buďto bříšky hráčových prstů, nebo pak systémem klapek. Celá mechanika bývá většinou postříbřená, složená ze slitin zinku, mědi a niklu. Horní díl je vybaven přefukovací klapkou na spodní straně, při jejímž stisknutí zní tón o dvoudecimu vyšší, dále jsou zde trylkovací klapky, půltónové klapky a tři otvory pro krytí prsty, na nichž jsou umístěny brýle, které ovládají další klapky a umožňují tak snazší technické postupy. Spodní díl je složen ze tří otvorů pro krytí prsty vybavenými brýlemi a dvou sad tzv. „malíkových klapek“.

Korpus, nebo-li ozvučník či nátrubek je poslední díl klarinetu, který zajišťuje akustické prodloužení nástroje a lepší vyrovnání tlaků mezi tlakem uvnitř trubice a atmosférickým tlakem okolí. Dále pak také zvyšuje vyzářený akustický tlak.

1.3 Princip vzniku tónu klarinetu

Za vznikem tónu stojí excitátor; proud vzduchu narážející na hranu plátku, který se vlivem své pružnosti, jak je blíže popsáno v kapitole 1.2.3, rozkmitává. Rezonátorem nástroje je samotné tělo; zvukovod. Jedná se o trubici s kuželovým vrtáním s jedním koncem uzavřeným a druhým otevřeným, která by měla mít co nejlepší rezonanční

vlastnosti pro vznik stojatého vlnění. Přímá vlna je generována oscilátorem (plátkem nástroje) a je šířena směrem k otevřenému konci trubice. Zde, díky náhlé změně průřezu a tím i impedance, dochází k jejímu odrazu zpět k uzavřenému konci. Interferencí těchto vln vzniká stojaté vlnění a nástroj tak produkuje tón. Akustický tlak na konci uzavřené trubice nabývá maximálních hodnot, z čehož vyplývá, že výchylka částic vzduchu zde nabývá svého minima a tvoří se zde tzv. uzel. Naopak na konci trubice otevřené nabývá akustický tlak hodnot minimálních, výchylka částic nabývá maxima a vyskytuje se zde tzv. kmitna [2].



Obr. 1.3: Kmity vzdušného sloupce v trubici s jedním koncem uzavřeným, překresleno z [2].

Toto pravidlo se nazývá okrajové podmínky pro vznik stojatého vlnění. Tyto podmínky jsou pro polootevřenou trubici dány vztahem:

$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l_a}, \quad (1.1)$$

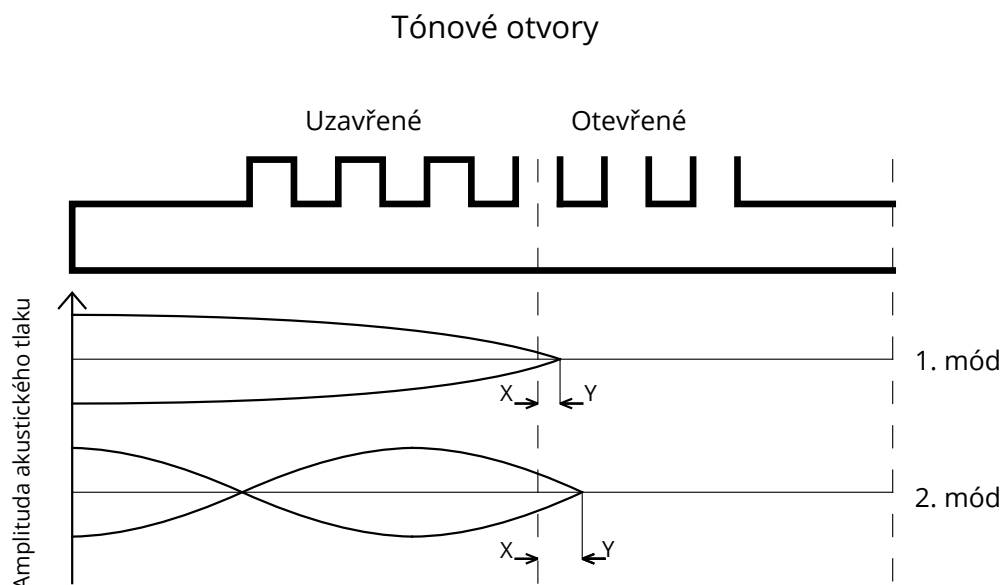
kde n značí celé číslo, c značí rychlost šíření zvuku v daném prostředí a l_a je akustická délka trubice. Ze vzorce 1.1 vyplývá, že klarinet kmitá pouze na lichých frekvencích a sudé frekvence jsou potlačeny. Akustická délka trubice l_a se vůči reálné délce trubice liší o korekci K . To je způsobeno nutností postupného vyrovnání hustoty vzduchu na konci trubice, tudíž uzly či kmitny jsou vysunuty z trubice ven [2]. Akustickou délku lze vyjádřit vztahem:

$$l_a = l_m + K, \quad (1.2)$$

kde l_m je mechanická délka trubice a K je délková korekce. Délkovou korekci pak pro válcové trubice lze určit vztahem:

$$K = 0,6r, \quad (1.3)$$

kde r je poloměr vrtání trubice. Stejný princip platí při zkracování trubice otevíráním tónových otvorů. Jelikož tyto otvory mají mnohem menší průměr, než je průměr vrtání nástroje, brání okamžitému vyrovnání tlaku v ose tónového otvoru X. Vyrovnání je provedeno až ve vzdálenosti Y a proto je nutné počítat s přesazením tónových otvorů o rozdíl těchto vzdáleností [2].



Obr. 1.4: Vliv otevřeného tónového otvoru na rozložení rezonančních módů. Překresleno z [2].

Tato vzdálenost narůstá při vyšších rezonančních módech, což zapříčiňuje tendenci nástroje ladit níže. Při určité mezní frekvenci se pak otevření tónových otvorů přestává zcela projevovat. Výpočet této mezní frekvence je dán vztahem:

$$f_m = 0,11c \frac{d}{D} \sqrt{\frac{4}{s(4t + 3d)}} y \quad (1.4)$$

kde c značí rychlost šíření zvuku, d je průměr postranních otvorů, D je průměr vrtání trubice, s je poloviční rozteč tónových otvorů a t je délka tónového otvoru.

Schopnost klarinetu přecházet do vyšších rezonančních módů se provádí díky tzv. přefouknutí, což je vlastně změna režimu kmitání vzdušného sloupce. *Pro snadnost a spolehlivost přefouknutí mají dřevěné nástroje přefukující otvor, při jehož otevření se sníží amplituda prvního rezonančního módu a vzdušný sloupec přejde do energeticky výhodnějšího režimu kmitání na nejbližším vyšším módu* [2].

Většina dřevěných dechových nástrojů je pak dále vybavena ozvučníkem. Toto rozšíření na konci trubice znamená jednak prodloužení akustické délky nástroje, tím i dosažení snížení frekvence rezonančních módů a změnu jejich neharmonicit a také

zvýšení vyzářeného akustického výkonu, který je úzce spojen s velikostí vyzařovací plochy. Tvar ozvučníků je většinou dán Besselovými křivkami, které nám určují poloměr pro každou délkovou souřadnici [2, 8]. Tyto křivky jsou dány vztahem:

$$r(x) = b(-x_0 - x)^{-\gamma}, \quad (1.5)$$

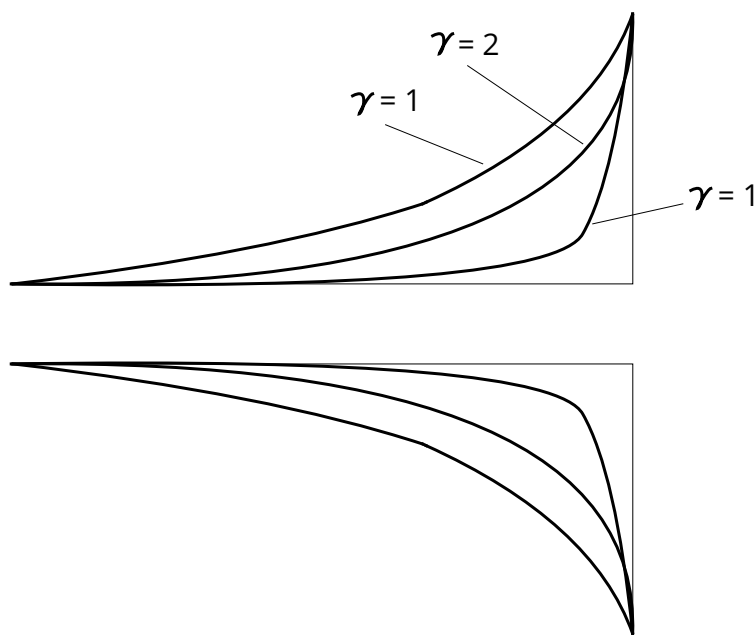
kde r značí poloměr vrtání trubice, b je konstanta zohledňující počáteční a konečný průměr zvukovodu, x je proměnná délková souřadnice, x_0 je počáteční délková souřadnice a γ je poměr rozšiřování zvukovodu.

Konstantu b pak určíme ze vztahu:

$$b = \left(\frac{d}{R_0^{-1/\gamma} - R_1^{-1/\gamma}} \right)^\gamma, \quad (1.6)$$

kde d je délka zvukovodu, R_0 je poloměr trubice na jejím vstupu a R_1 je koncový průměr. Počáteční délkovou souřadnici x_0 určíte ze vztahu:

$$x_0 = - \left(\frac{R_0}{b} \right)^{-1/\gamma}. \quad (1.7)$$



Obr. 1.5: Besselovy zvukovody. Překresleno z [2].

1.3.1 Klarinetové rejstříky

Můžeme rozlišovat čtyři základní klarinetové rejstříky, které se rozlišují podle barvy; poměru lichých a sudých harmonických složek.

1. Šalmajový rejstřík – zde můžeme řadit tóny od e do e1, vyznačují se velkou převahou lichých harmonických složek a tón má tak velmi tmavou barvu.
2. Slabý šalmajový rejstřík – řadíme tóny od f1 do b1, tón má podobnou barvu jako v šalmajovém rejstříku, začínají se však více projevovat sudé harmonické složky.
3. Klarinetový rejstřík – tóny od h1 do c3, sudé harmonické složky se začínají více vyrovnávat složkám lichým. Tóny mají sytou barvu.
4. Vysoký rejstřík – Sudé harmonické složky jsou již skoro vyrovnané s lichými, tóny jsou velmi ostré. Řadíme zde tóny od cis3 a vyšší [4, 2].

2 Harmonická analýza signálu

2.1 Fourierova transformace

Každý periodický signál nesínusového tvaru s periodou T , má-li v intervalu konečný počet nespojitostí a extrémů, je možné rozložit na několik harmonických složek, kde tyto složky jsou celočíselnými násobky složky první; fundamentu. Takovýmto rozkladem signálu se začal jako první zabývat Jean Baptiste Joseph Fourier, proto se tato analýza nazývá také Fourierovou transformací. *Diskrétní Fourierova transformace DFT (Discrete Fourier Transform) je pak vztažena výhradně k navzorkovaným, tedy v čase (zpravidla i v úrovni) diskretizovaným, resp. digitálním signálům. Pro odvození vzorce je nejdříve zapotřebí uvést základní vztah pro výpočet kmitočtového spektra periodického spojitého signálu [7]:*

$$X(k) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-j\omega_k t} dt \quad (2.1)$$

Při navzorkování periodicky se opakujícího úseku o délce T počtem vzorků N lze dále ve tvaru:[7]

$$X(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j\omega_k t} dt \quad (2.2)$$

zavedeme substituci prvků:

$$T = NT_{vz}; \quad dt = T_{vz}; \quad x(t) = x(n); \quad \int_0^T = \sum_{n=0}^N; \quad t = nT_{vz} \quad (2.3)$$

dosáhneme vzorce:

$$X(k) = \frac{1}{NT_{vz}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega_k n T_{vz}} \quad (2.4)$$

a provedeme úpravu úhlového kmitočtu:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{NT_{vz}} \quad (2.5)$$

a vykrácením vzorce 3.4 je dán přímý vztah pro DFT:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.6)$$

kde n označuje odpovídající vzorek v čase a k odpovídající vzorek v kmitočtu. Výsledkem přímé DFT je tedy posloupnost komplexních spektrálních koeficientů $X(k)$ definujících intenzitu spektra v bodech, jejichž počet je dán délkou vstupní posloupnosti $x(n)$. Spektrální koeficienty jsou pak nejčastěji zobrazeny ve formě modulové

kmitočtové charakteristiky, kde je modul dán absolutní hodnotou spektrálních koeficientů v logaritmickém měřítku. Podobně je také přistupováno ke kmitočtové ose, neboť lidské ucho tyto veličiny vnímá právě logaritmicky[7].

2.1.1 Krátkodobá Fourierova transformace

Pro velkou náročnost výpočtu DFT byl vyvinut algoritmus Rychlé Fourierovy transformace (FFT), který tento výpočet velmi urychlil. FFT je tak možné chápat jako postup pro rychlé vypočtení DFT [9].

2.2 Lineární prediktivní kódování

Lineární prediktivní kódování (LPC - Linear Predictive Coding) je kódovací algoritmus pro reprezentaci spektrální obálky nejčastěji řečových signálů, lze ji ale stejně tak použít pro stanovení formantů hudebních signálů.

2.3 Harmonická řada

Harmonická řada je posloupnost celočíselných násobků základní frekvence, neboli fundamentu. V závislosti na zastoupení jednotlivých lichých harmonických složek se tvoří barva tónu, sudé harmonické pak určují jeho celkovou mohutnost a jasnost. Tuto řadu můžeme rozdělit do několika pásem:

- **První pásmo** - 1. až 8. harmonická složka
 1. harmonická (fundament) určuje celkovou energii.
 2. harmonická přidává na mohutnosti.
 3. harmonická přidává dutost.
 4. harmonická přidává tónu na jasnosti.
 5. harmonická přidává nazálnost.
 6. harmonická přidává tónu na jasnosti.
 7. harmonická přidává tónu hrubost a brisknost.
 8. harmonická přidává tónu na jasnosti.
- **Druhé pásmo** - 9. až 16. harmonická složka V tomto pásmu harmonické přidávají tónu ostrost, sytost či měkké zvonění, již vnímáme jako klastry.
- **Třetí pásmo** - 17 až 32. harmonická složka vnímáme již jako spojitá spektra, například ostrý cinkot nebo bzučení.
- **Poslední pásmo** - v tomto pásmu jsou zastoupeny harmonické od 32. a vyšší, které vnímáme již jako šum a je neharmonické [10, 2].

2.3.1 Inharmonicity

Inharmonická složka je každá taková, která není přesným celočíselným násobkem fundamentu. Inharmonicity pak určuje míru odchylky pomocí koeficientu inharmonicity b od nejbližší harmonické složky. Určitá neharmonicity je u nástrojů přijatelná a dokonce žádoucí, zejména pak u bicích nástrojů. Inharmonicitu můžeme určit ze vztahu [11]:

$$f_n = n f_1 \sqrt{1 + b n^2} \quad (2.7)$$

kde f_n je frekvence n -té harmonické, f_1 je frekvence první harmonické a n je celé číslo.

3 Samotné měření

Pro měření byl k dispozici klarinet značky Amati Kraslice, model ACL 312 s originálním ozvučnickem a ozvučnickem Special z jiného modelu klarinetu. Z důvodu odlišného průměru spodní části těla byl výběr ozvučníků značně omezen a nepodařilo se sehnat ozvučník, který by se svým tvarem značně odlišoval.

3.1 Mechanické měření

Nejprve bylo třeba mechanicky změřit dostupné ozvučníky. Důležité bylo vynést si křivku vnitřního tvaru ozvučníku a zjistit jeho celkovou délku a váhu. Pro vynesení vnitřního tvaru jsem pro využil obtiskového materiálu, kterým jsem vyplnil korpus a následně prováděl jeho měření. Měření bylo provedeno po krocích 5mm a výsledky jsou zaznačeny v následujících tabulkách:

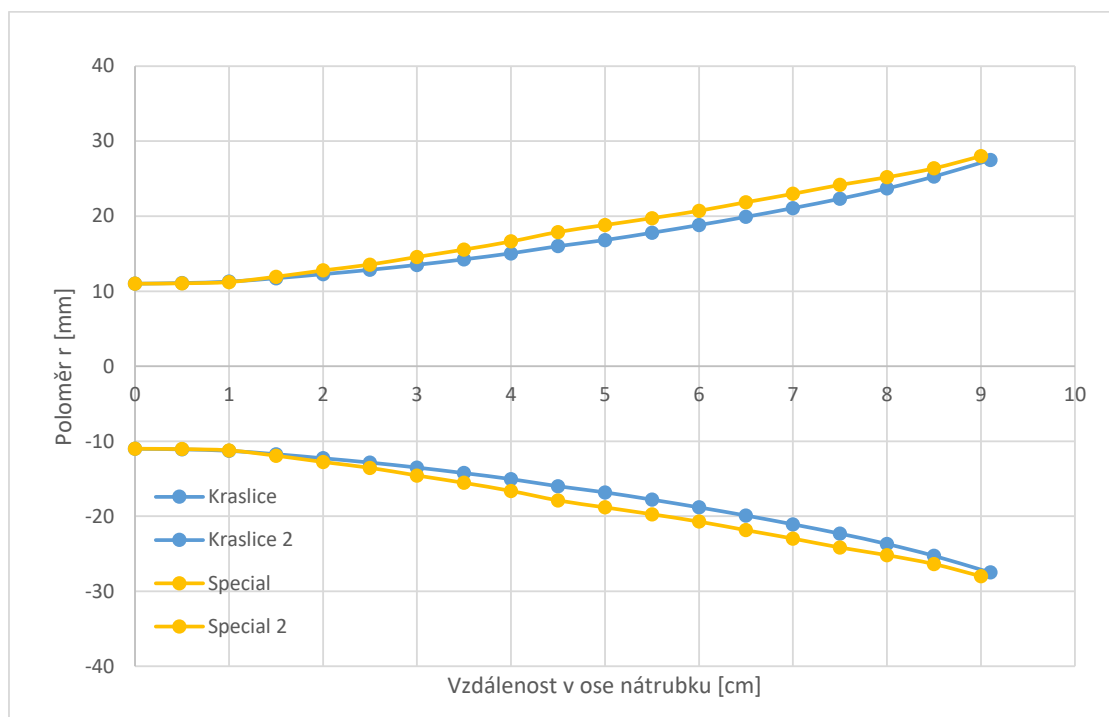
Nátrubek	Kraslice									
Váha	118g									
Vzdálenost v ose nátrubku [cm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Poloměr r [mm]	11	11,09	11,28	11,73	12,27	12,85	13,51	14,25	15,05	16
Vzdálenost v ose nátrubku [cm]	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9,1	
Poloměr r [mm]	16,82	17,79	18,82	19,91	21,08	22,32	23,7	25,28	27,5	

Tab. 3.1: Tabulka vnitřních rozměrů ozvučníku Kraslice

Nátrubek	Special									
Váha	100g									
Vzdálenost v ose nátrubku [cm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Poloměr r [mm]	11	11,05	11,22	11,93	12,77	13,55	14,57	15,55	16,63	17,89
Vzdálenost v ose nátrubku [cm]	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	
Poloměr r [mm]	18,82	19,74	20,72	21,86	22,98	24,17	25,19	26,38	28	

Tab. 3.2: Tabulka vnitřních rozměrů ozvučníku Special

Jak lze z tabulek vyčíst, ozvučníky se liší až o 2mm na průměru, a to v jejich přibližném středu. Originální nátrubek je celkově užší a o 1mm delší. Zároveň je oproti ozvučníku Special o 18g těžší, což je pravděpodobně způsobeno silnější stěnou či vyšší hustotou dřeva. Na obr. 3.1 si můžeme prohlédnout rozdílný tvar ozvučníku v grafické podobě.



Obr. 3.1: Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučnicků

3.2 Měření směrovosti a spektra

Aby výsledky byly co nejvíce vypovídající a předešlo se nežádoucímu ovlivnění výsledku okolními odrazy, proběhlo měření v bezodrazové komoře na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Jelikož nebyla k dispozici umělá ústa, která by eliminovala lidský faktor a zajistila vždy stejný přítlak plátku a tlak vzduchu, musel na klarinet hrát reálný hráč. K dosažení nejlepších výsledků byly dodrženy základní zásady jako dostatečný čas pro odpočinek hráče mezi nahráváním, rozehrání nástroje před započítáním nahrávání, vše probíhalo během jednoho dne za stejných klimatických podmínek na jeden nástroj s jedním plátkem, jehož poloha nebyla od započetí nahrávání více upravována.

Velmi důležitou fází bylo nastavení měřících mikrofونů. Jelikož klarinet je nástroj vyzařující především před sebe, bylo zvoleno použití desíti mikrofонů pro měření směrovosti, rozmístěných rovnoměrně v půlkruhu s krokem 20° a jednoho mikrofону pro měření spektra umístěného přímo před hráče. Pro dosažení co největšího odstupu od šumu i v nízkých dynamikách byly mikrofony ve vzdálenosti 1 m od hráče ve výšce 140 cm, kde se nachází předěl mezi horní a spodní částí těla klarinetu a je zde vyzářeno nejvíce energie. Vzdálenost hráče od zadní stěny byla 1 m.

3.2.1 Použité zařízení pro měření

Pro měření směrové charakteristiky byly k dispozici mikrofony AUDIX TM1, což jsou kondenzátorové mikrofony s velmi plochou frekvenční charakteristikou v pásmu 20 Hz–25 kHz. Odstup užitečného signálu od šumu je udáván 66 dB, dynamický rozsah 120 dB, výstupní impedance je 200 Ω a citlivost je 6 mV/Pa [12].

Pro měření spektra byl k dispozici mikrofón Brüel&Kjaer Type 4189. Jedná se o mikrofón s velmi vyrovnanou frekvenční charakteristikou v pásmu 10 Hz–10 kHz s celkovým rozsahem 6,3 Hz–20 kHz. Citlivost mikrofónu je 50 mV/Pa, dynamický rozsah je udáván 16–146 dB [13].

O převedení signálu na digitální se postarala zvuková karta M-AUDIO PROFIRE a ten byl pak zaznamenán pomocí DAW Cubase a vyexportován v bitové hloubce 24 bit a vzorkovací frekvenci 48 kHz.

3.2.2 Vybrané tóny pro měření

Pro měření byly vybrány čtyři tóny ze šalmajového rejstříku a čtyři tóny z rejstříku klarinetového. Za předpokladu, že největší ovlivnění tvarem ozvučnicku bude při zavřených tónových otvorech byly vybrány tyto tóny:

- Tón e byl vybrán jako nejnižší možný tón daného typu klarinetu, při jehož hře jsou zavřeny všechny postranní otvory a všechna vyzařovaná energie vychází korpusem klarinetu.
- Tón f byl vybrán jako druhý nejnižší tón daného klarinetu, aby bylo možné sledovat změnu při postupném otevírání postranních klapek.
- Tón g byl vybrán jako třetí nejnižší tón daného klarinetu a to ze stejného důvodu jako tón f1.
- Tón c1 byl vybrán jako mezistupeň mezi otevřenými a zavřenými tónovými otvory, jelikož při jeho hře jsou otvory horního dílu uzavřené a otvory spodního dílu otevřené.
- Tón h1 byl vybrán jako nejnižší možný tón daného typu klarinetu při použití přefukovací klapky, při jehož hře jsou zavřeny všechny postranní otvory a všechna vyzařovaná energie vychází korpusem klarinetu.
- Tón c2 byl vybrán jako druhý nejnižší tón daného klarinetu při použití přefukovací klapky, aby bylo možné sledovat změnu při postupném otevírání postranních klapek.
- Tón d2 byl vybrán jako třetí nejnižší tón daného klarinetu a to ze stejného důvodu jako tón c2.
- Tón c3 byl vybrán jako poslední běžným hmatem dostupný tón při použití přefukovací klapky.

3.2.3 Prostředí MATLAB pro zpracování naměřených hodnot

Pro zpracování naměřených hodnot byl použit MATLAB, což je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk. Skripty pro vyhodnocení směrové charakteristiky a spektra jsem převzal ze zdrojů [7, 11] a následně poupravil pro potřeby mé práce, kde se lišily počty měřených vzorků.

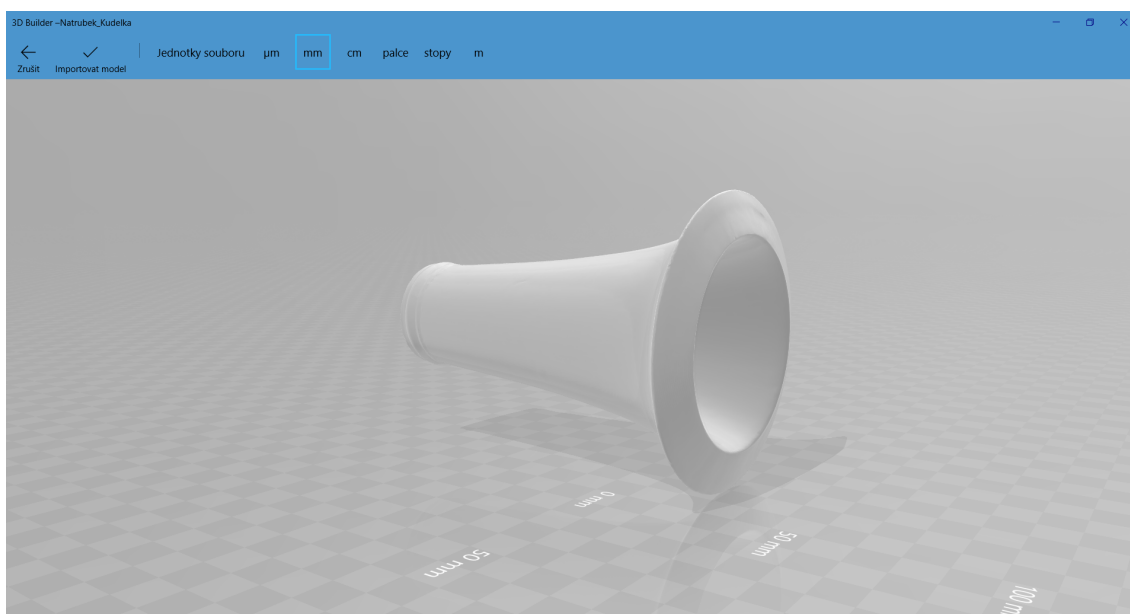
4 Návrh a konstrukce nového ozvučníku

Záměrem při návrhu a konstrukci nových ozvučnicků bylo vytvořit tři nové ozvučníky. Již při zadání bylo jisté, že se nepodaří vyrobit ozvučníky z dokonale stejného materiálu, z jakého je vyroben originál. Aby bylo možné porovnat vliv změny materiálu na výsledné frekvenční spektrum a směrovou charakteristiku, bylo nutné vyrobit jeden nátrubek stejného tvaru. Dále pak pro možnost sledovat změny těchto parametrů při změnách velikosti či vnitřního tvaru, byly vyrobeny dva nátrubky, které se lišily právě koncovým průměrem nebo svým vnitřním tvarem.

4.1 Měření 3D scannerem ATOS 1

Pro ověření mechanicky naměřených hodnot ozvučníku Kraslice a zjednodušení při modelování ozvučnicků nových, byl tento ozvučnick podroben měření 3D scannerem. Měření probíhalo na půdě Fakulty výtvarného umění Vysokého učení technického v Brně a to za pomoci 3D scanneru ATOS 1.

Toto zařízení snímá za pomoci několika kamer skenovaný povrch a tyto informace převádí do digitální podoby, kde jsou zobrazeny jako množina bodů. Tento scanner zajišťuje dostatečnou výslednou rozměrovou přesnost.



Obr. 4.1: Sken originálního nátrubku Kraslice

4.2 Návrh zvukovodu

4.2.1 Aplikace Besselových zvukovodů

Besselovy zvukovody již byly popsány v kap. 1.3, je však potřeba aplikovat tyto křivky na originální ozvučnick a zjistit jeho parametry, zejména tedy jeho poměr rozšiřování y . Poměr y volíme v tomto případě tak, aby se jednotlivé hodnoty co nejvíce přiblížily hodnotám naměřeným.

Po dosazení rozměrů do rovnice 1.6 vypočítáme konstantu b :

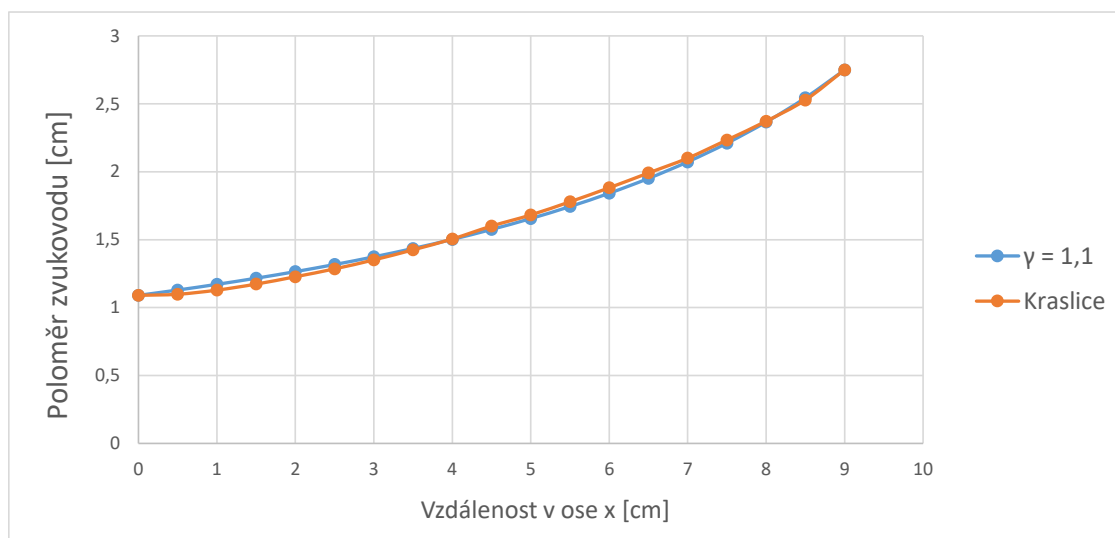
$$b = \left(\frac{9,1}{1,09^{-1/1,1} - 2,75^{-1/1,1}} \right)^{1,1} = 22,7299 \quad (4.1)$$

tuto hodnotu pak následně dosadíme do vzorce 4.2 a vypočítáme počáteční délkovou souřadnici x_0 :

$$x_0 = - \left(\frac{1,09}{22,7299} \right)^{-1/1,1} = -15,8214 \text{ cm.} \quad (4.2)$$

Nakonec dle vzorce 4.3 vypočítáme hodnotu poloměru pro zvolenou délkovou souřadnici x , pro $x = 0$ se musí tato hodnota rovnat zvolenému poloměru na začátku zvukovodu:

$$r(0) = 22,7299 \cdot (15,8214 - 0)^{-1,1}, = 1,09 \text{ cm.} \quad (4.3)$$



Obr. 4.2: Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučnicků

Na grafu 4.2 můžeme vidět grafické porovnání původního ozvučnicku s vypočítanou křivkou dle Besselových zvukovodů a to pro hodnotu $\gamma = 1,1$. Pro tuto hodnotu

je odchylka od původního ozvučníku nejmenší a to ve vzdálenosti $x = 1,5$ cm. Tato odchylka činí 3,79 %.

4.2.2 Samotný návrh

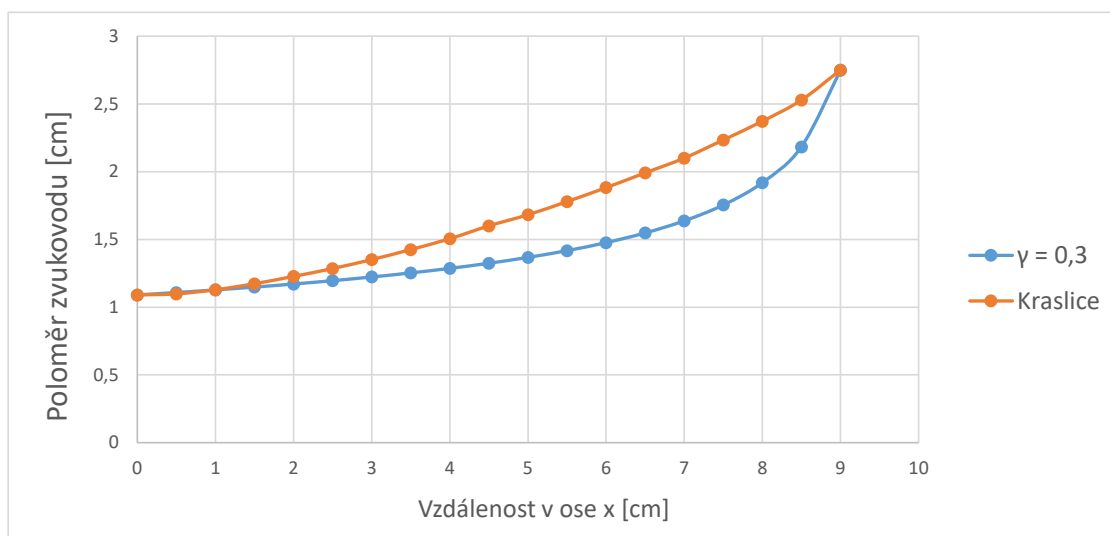
Cílem bylo vytvořit tři odlišné nátrubky, které se budou lišit jednak použitým materiálem, ale také poměrem rozšiřování γ . Pro jejich realizaci byl zvolen tisk na 3D tiskárně a to především pro jednoduchost výroby a zaručení přesných rozměrů.

Návrh č. 1 - kopie nátrubku Kraslice

Tento nátrubek měl sloužit především k pozorování změn vlastností nástroje při použití nátrubku se stejným tvarem, avšak rozdílným materiálem. Proto jako model pro 3D tisk byl použit sken originálního nátrubku Kraslice.

Návrh č. 2 - poměr rozšiřování $\gamma = 0,3$

Tento nátrubek měl určit, jak velký vliv má změna poměru rozšiřování γ na výslednou směrovou charakteristiku i spektrum. Počáteční i konečné průměry nátrubku zůstaly stejné, ale výrazně se mění právě poměr rozšiřování, kdy při této hodnotě je konec nátrubku daleko strmější, naopak průměr na jeho ústí se mění pozvolněji. Hodnota $\gamma = 0,3$ je používána například u žestových nástrojů. Níže můžeme vidět tabulku poloměrů 4.3 pro jednotlivé délkové souřadnice a jejich graf 4.1.



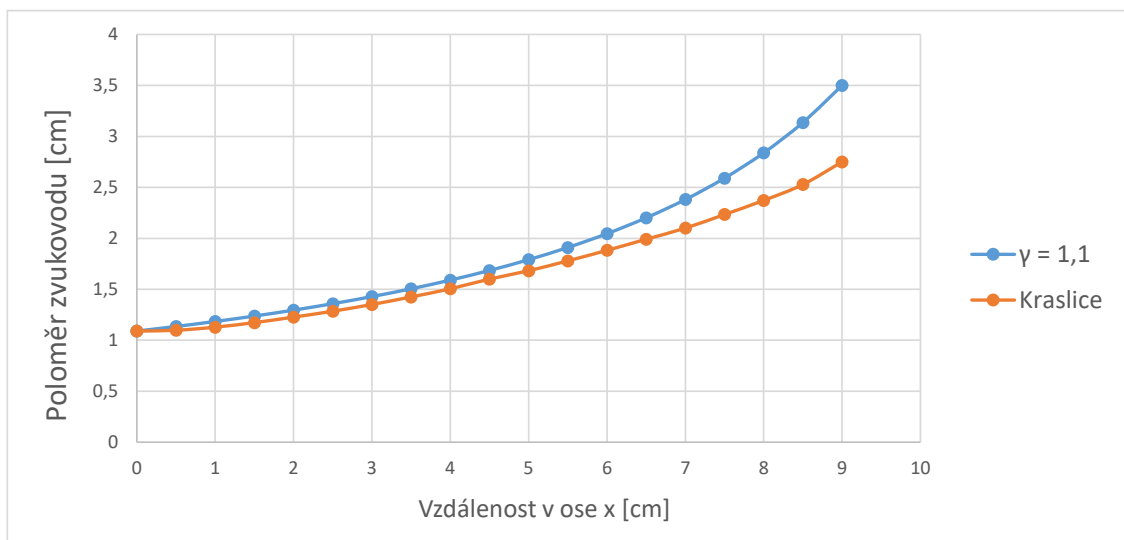
Obr. 4.3: Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučnicků

Nátrubek pro $\gamma = 0,3$																			
x [cm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
r [cm]	1,090	1,129	1,171	1,216	1,265	1,317	1,374	1,435	1,502	1,575	1,655	1,744	1,842	1,951	2,073	2,210	2,366	2,544	2,750

Tab. 4.1: Tabulka poloměru nátrubku pro $\gamma = 0,3$

Návrh č. 3 - poměr rozšiřování $\gamma = 1,1$

Poslední nátrubek slouží k pozorování změn směrové charakteristiky a spektra při změně koncového průměru nátrubku. Koncový poloměr byl změněn z 275 mm na 350 mm a to při zachování stejného poměru rozšiřování γ jako u originálního nátrubku Kraslice. Níže můžeme vidět tabulku poloměrů 4.4 pro jednotlivé délkové souřadnice a jejich graf 4.2.



Obr. 4.4: Graf zobrazující rozdíly vnitřního tvaru ozvučníků

Nátrubek pro $\gamma = 1,1$																			
x [cm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
r [cm]	1,090	1,135	1,184	1,237	1,295	1,359	1,428	1,505	1,590	1,685	1,791	1,910	2,046	2,201	2,381	2,590	2,839	3,136	3,500

Tab. 4.2: Tabulka poloměru nátrubku pro $\gamma = 1,1$

4.2.3 Výroba nátrubku

Pro výrobu navržených nátrubků byl zvolen tisk na 3D tiskárně, a to pro jeho jednoduchost a přesnost. Tisk probíhal na Fakultě výtvarného umění Vysokého učení technického v brně za pomoci 3D tiskárny Dimension sst 768.



Obr. 4.5: Finální výtisky nátrubků



Obr. 4.6: Finální výtisky nátrubků

5 Výsledky měření

5.1 Tón e

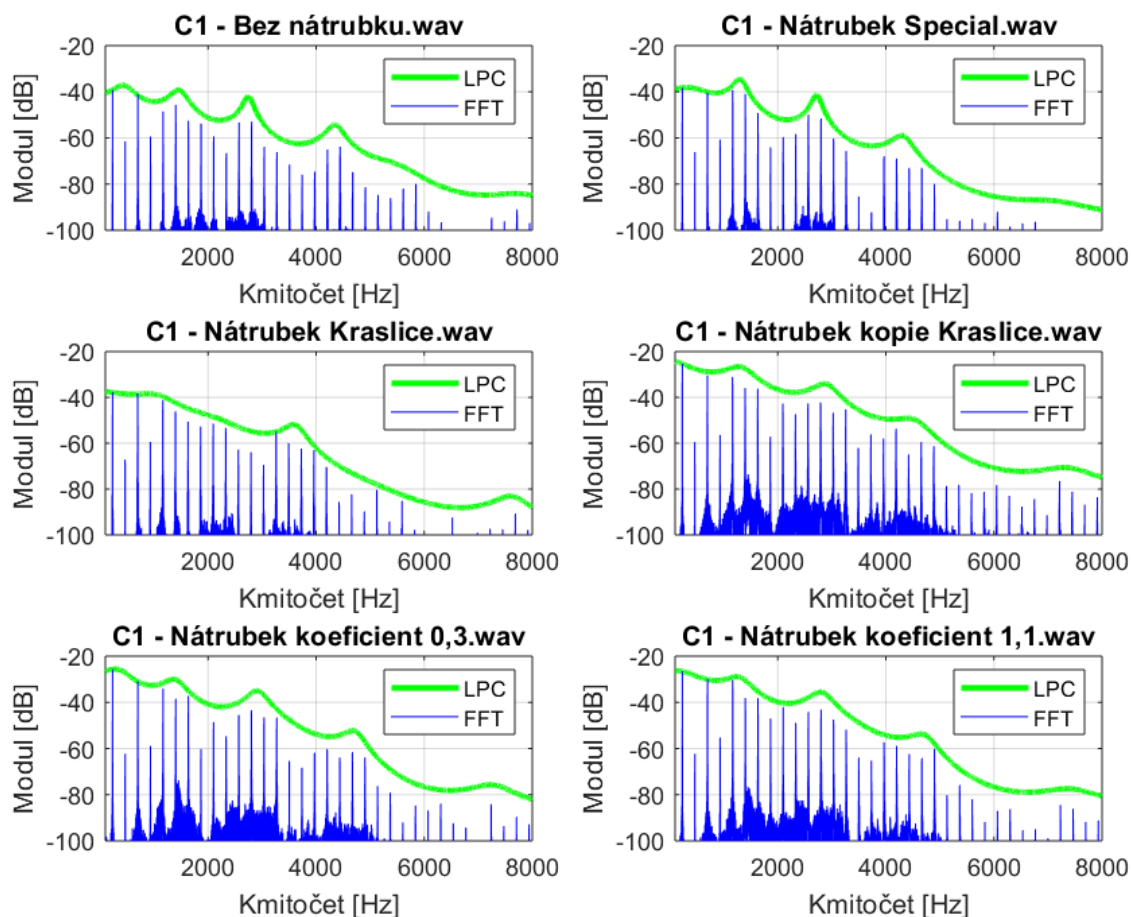
Tón	e					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	147,003	148,003	154,003	0,000	0,000	0,000
2.	295,006	297,006	307,006	-32,612	-27,478	-25,139
3.	442,009	445,009	461,010	-1,677	-2,710	-1,357
4.	590,012	593,012	614,013	-14,610	-17,997	-21,065
5.	737,015	742,015	768,016	-10,907	-11,952	-6,588
6.	885,018	890,019	921,019	-20,836	-21,190	-16,084
7.	1032,022	1038,022	1075,022	-14,962	-17,229	-10,595
8.	1180,025	1187,025	1227,026	-13,886	-16,601	-21,274
9.	1327,028	1336,028	1381,029	-13,353	-17,158	-12,681

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	148,003	145,003	148,003	0,000	0,000	0,000
2.	296,006	291,006	295,006	-28,660	-24,809	-30,434
3.	444,009	436,009	443,009	-5,106	-2,896	-1,686
4.	592,012	581,012	591,012	-24,417	-22,038	-20,068
5.	741,015	726,015	738,015	-16,723	-14,264	-13,451
6.	889,019	871,018	887,018	-28,380	-22,302	-18,226
7.	1037,022	1016,021	1035,022	-24,611	-28,167	-16,898
8.	1186,025	1161,024	1180,025	-22,630	-24,481	-17,045
9.	1328,028	1306,027	1331,028	-22,906	-22,230	-15,957

Tab. 5.1: Tabulka spektra tónu e

5.1.1 Zhodnocení výsledků tónu e

Při hře tónu e na klarinet jsou všechny otvory uzavřené tudíž veškerá energie je vyžářena ozvučníkem. U tohoto tónu se nejvýrazněji projevuje změna akustické délky, která již není bez ozvučníku dostatečná a jak lze vyčíst z tabulky 5.1, můžeme pozorovat velký rozdíl frekvence fundamentu až o 6 Hz. Při použití ozvučníků plastových tento jev vymizí, což znamená že v tomto případě nemá použitý materiál výrazný vliv na základní frekvenci tónu. V případě posledního ozvučníku je sice základní frekvence vyšší, ale to lze spíše přisuzovat odlišnému nátisku (přílišný tlak rtu má



Obr. 5.1: FFT a LPC tónu e

za následek zvýšení základní frekvence). Z hlediska zastoupení jednotlivých harmonických složek lze říci, že u všech případů zde převažuje třetí a pátá harmonická složka, které tvoří typicky klarinetový dutý a nazální tón. Nejméně se třetí a pátá složka projevila u kopie nátrubku Kraslice, z čehož lze vyvodit, že nátrubek z tohoto lehčího materiálu méně podporuje tyto složky. Díky LPC analýze můžeme již zde vidět formující se formantové oblasti a to především v oblastech kolem 1 kHz, 2,5 kHz a poslední v oblasti kolem 4,5 kHz. Nejméně tyto oblasti podporuje originální nátrubek Kraslice. Směrové charakteristiky (které jsou přiloženy jako příloha) tohoto tónu by měly být v podstatě všesměrové, díky zavření všech tónových otvorů. Toto měření v podstatě potvrzuje, ovšem jsou zde lokální výkyvy u druhé harmonické složky, které mohly být způsobeny chybou měření.

5.2 Tón f

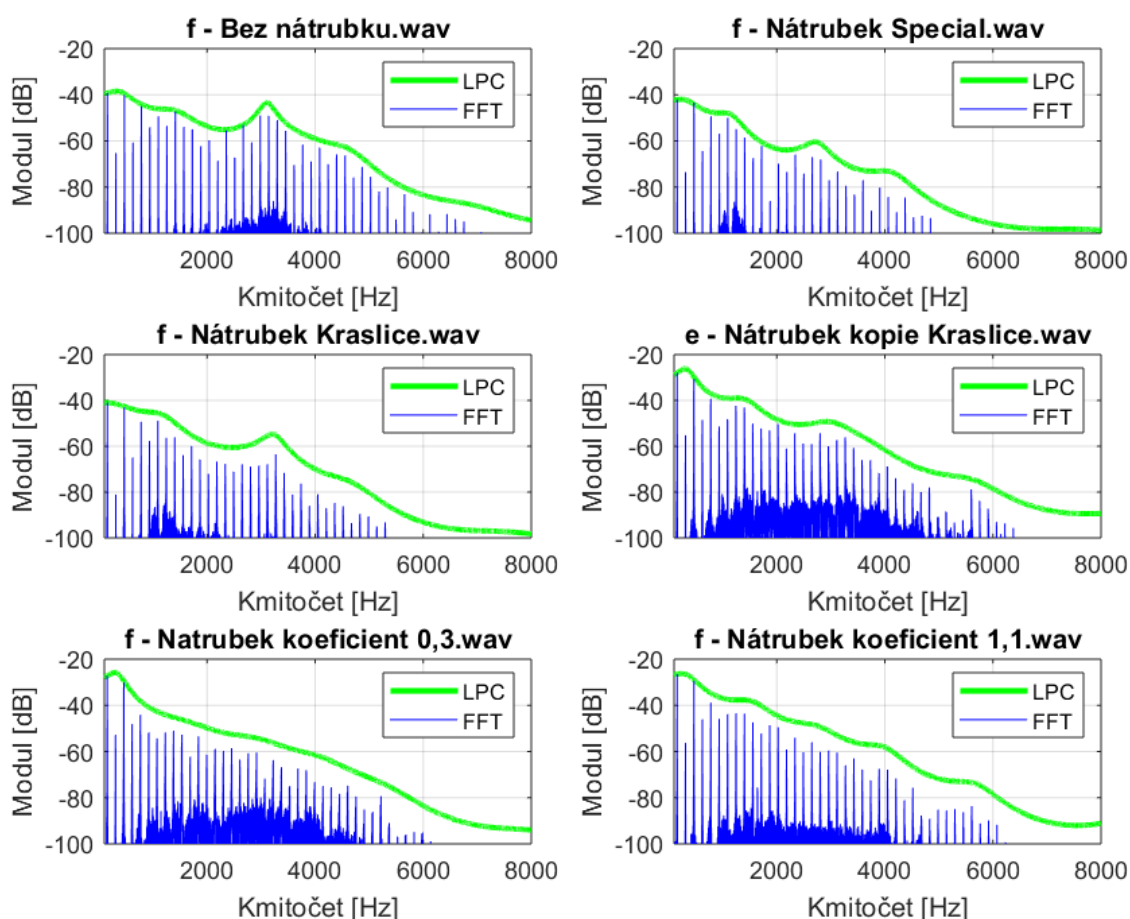
Tón	f					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f[Hz]			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	156,003	156,003	157,003	0,000	0,000	0,000
2.	312,007	312,007	314,007	-40,136	-31,453	-26,025
3.	469,010	469,010	472,010	-2,023	-1,350	-0,957
4.	625,013	625,013	629,013	-23,944	-22,325	-21,524
5.	781,016	781,016	786,016	-8,330	-7,287	-5,842
6.	937,020	937,020	943,020	-16,718	-14,752	-14,888
7.	1094,023	1093,023	1100,023	-7,928	-7,913	-10,155
8.	1250,026	1249,026	1257,026	-15,334	-12,782	-14,277
9.	1406,029	1406,029	1414,029	-15,149	-16,458	-8,095

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f[Hz]			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	156,003	154,003	156,003	0,000	0,000	0,000
2.	313,007	308,006	312,007	-28,977	-26,829	-31,098
3.	468,010	462,010	468,010	-5,558	-6,329	-4,092
4.	624,013	617,013	624,013	-23,093	-23,728	-21,291
5.	780,016	768,016	780,016	-15,869	-17,893	-14,438
6.	936,020	922,019	936,020	-28,470	-25,054	-21,674
7.	1092,023	1075,022	1092,023	-24,445	-29,584	-17,964
8.	1247,026	1229,026	1248,026	-19,732	-26,416	-16,938
9.	1403,029	1383,029	1404,029	-20,359	-24,232	-16,819

Tab. 5.2: Tabulka spektra tónu f

5.2.1 Zhodnocení výsledků tónu f

Při hře tónu f na klarinet je otevřena poslední malíčková klapka na spodním středovém dílu, tím pádem vzduchový sloupec končí již u tohoto otvoru a změna frekvence se tak znatelně neprojevuje, ač mírnou pozorovat můžeme. Připojení ozvučníku výrazně omezí druhou a čtvrtou harmonickou složku. Výrazně se také projevuje snížení rezonančních módů. Nejvýrazněji zde opět převládá třetí a pátá složka s důrazem hlavně na třetí. Při srovnání ozvučníku Kraslice a Kraslice kopie se potvrzuje, že při použití plastového nátrubku je podpora třetí a páté harmonické složky menší. Dále lze vidět, že u plastových nátrubků zde není tak výrazný pokles druhé harmonické složky po jejich připojení, podporují mohutnost tohoto tónu. Při srovnání pouze



Obr. 5.2: FFT a LPC tónu f

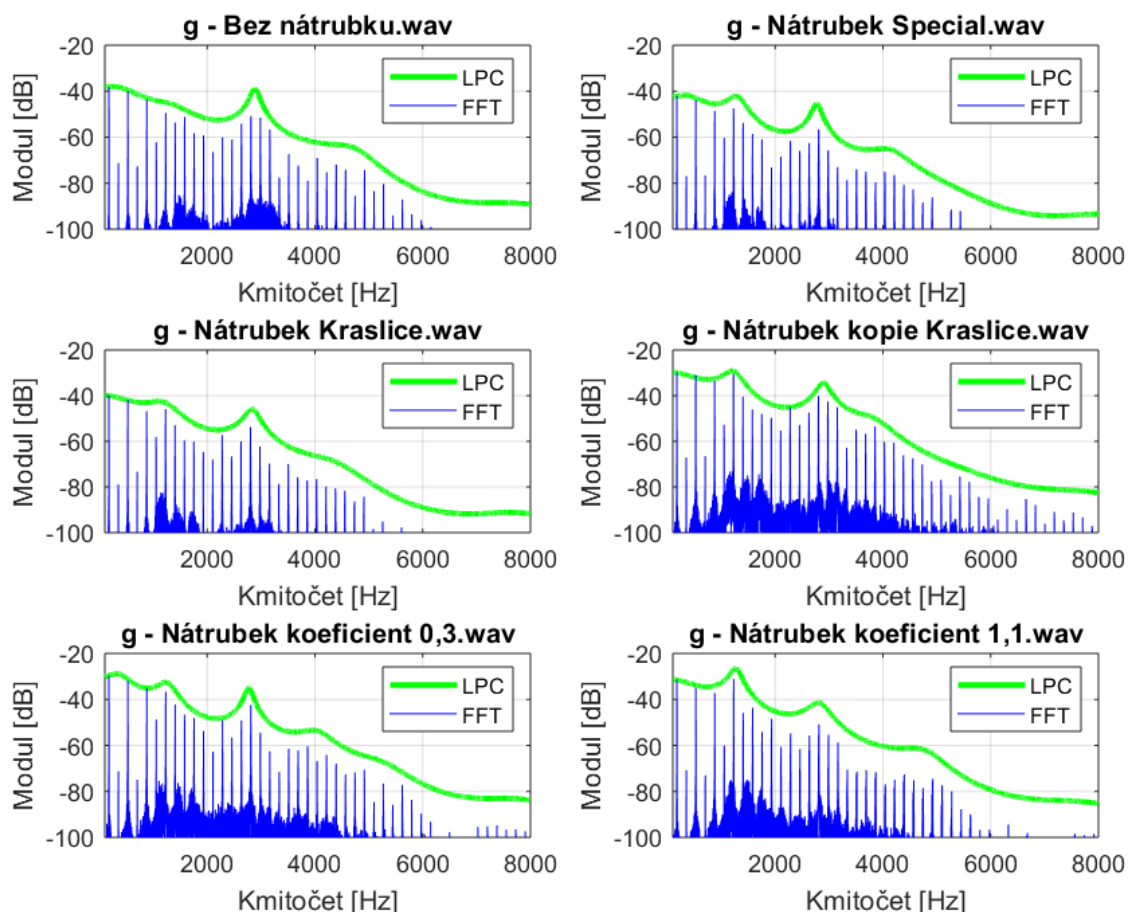
plastových nátrubků jsou hodnoty podobné, nejvíce se odlišuje nátrubek $\gamma = 1,1$, který má také nejodlišnější z hlediska rozměrů. Nejméně z trojice podporuje mohutnost tónu, více však jasnost, nazálnost a dutost. Tvoří tak typický klarinetový tón, né však tak, jako nátrubky dřevěné. Z hlediska formantových oblastí lze u měření dřevěných nátrubků a měření bez nátrubku pozorovat tvořící se formantovou oblast v okolí 3 kHz, u ostatních tato oblast není skoro znatelná a charakteristika je rovnoměrně klesající. Směrové charakteristiky jsou velmi podobné předešlému měřenému tónu, což je dáno především tím, že při tónu f se oproti tónu e otevírá pouze jedna klapka.

5.3 Tón g

Tón	g					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f[Hz]			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	175,004	175,004	176,004	0,000	0,000	0,000
2.	351,007	351,007	351,007	-38,959	-34,813	-33,181
3.	526,011	526,011	527,011	-1,733	-1,732	-1,894
4.	702,015	702,015	703,015	-33,378	-34,418	-34,647
5.	877,018	877,018	879,018	-6,813	-6,378	-5,604
6.	1053,022	1052,022	1054,022	-18,163	-18,220	-24,152
7.	1228,026	1228,026	1230,026	-5,949	-5,296	-11,463
8.	1403,029	1403,029	1406,029	-12,879	-11,564	-15,633
9.	1578,033	1578,033	1581,033	-19,684	-16,437	-13,105

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	175,004	176,004	175,004	0,000	0,000	0,000
2.	351,007	351,007	351,007	-38,322	-42,580	-35,262
3.	526,011	527,011	526,011	-0,198	-1,653	0,460
4.	701,015	703,015	701,015	-37,101	-39,697	-38,768
5.	877,018	878,018	877,018	-5,730	-7,903	-1,902
6.	1052,022	1054,022	1052,022	-22,630	-18,458	-19,575
7.	1227,026	1230,026	1228,026	-1,250	-9,345	1,209
8.	1402,029	1405,029	1403,029	-10,864	-12,335	-4,395
9.	1577,033	1581,033	1578,033	-16,516	-18,548	-4,470

Tab. 5.3: Tabulka spektra tónu g



Obr. 5.3: FFT a LPC tónu g

5.3.1 Zhodnocení výsledků tónu g

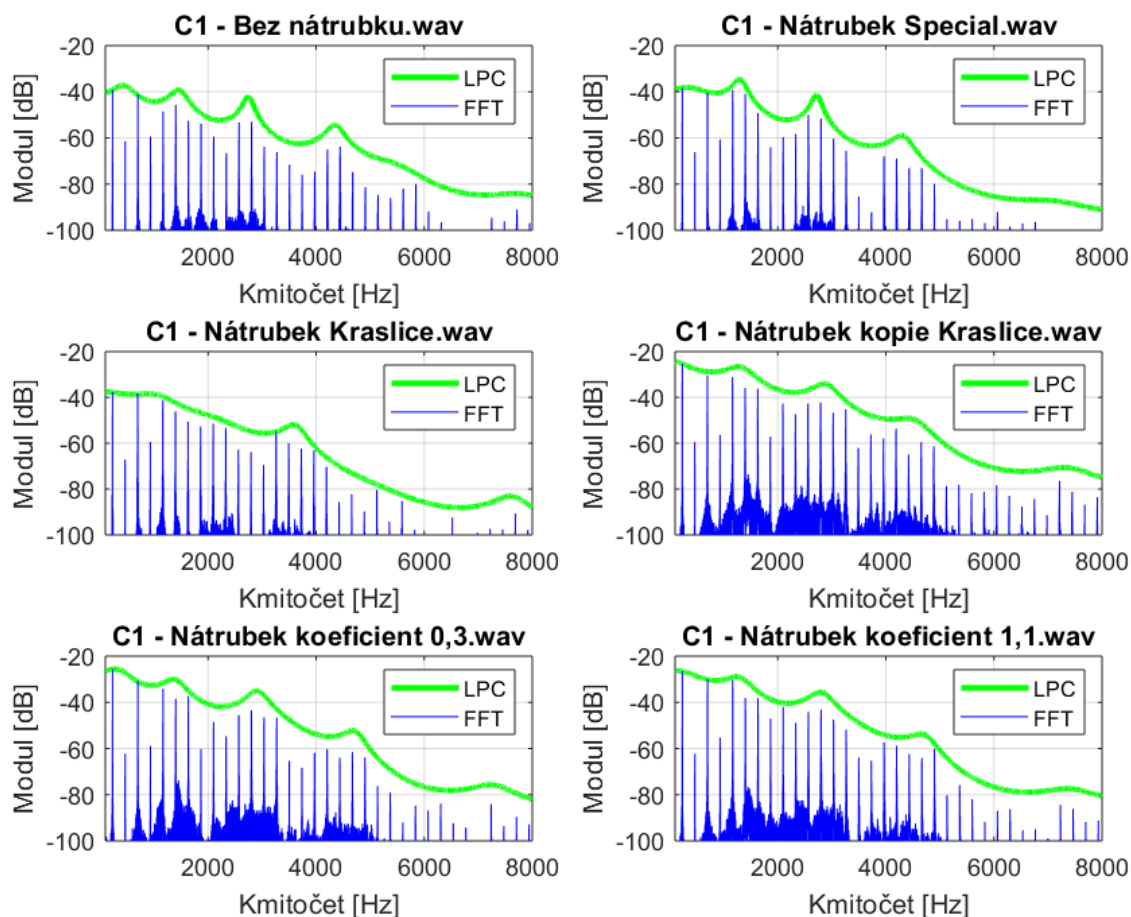
Při hře tónu g na klarinet jsou otevřeny obě malíkové klapky na spodním středovém dílu. Jelikož se tyto otvory nachází stále na samém konci trubice, můžeme pořád pozorovat mírnou odchylku základní frekvence bez použití ozvučníku, ovšem toto může být opět způsobeno odlišným nátiskem, jelikož tento jev vidíme i po připojení plastového ozvučníku. Vyšší harmonické se frekvenčně liší jen velmi mírně. Rozdíl modulu vyšších harmonických složek s použitím ozvučníků je již menší než u tónu f. Třetí harmonické složky jsou velmi vyrovnané u všech typů, pátá složka je nejsilnější u nátrubku $\gamma = 1,1$. Z hlediska formantových oblastí je u všech nátrubků patrná oblast v okolí frekvence 3 kHz, dále pak lze vidět, že připojení ozvučníku podporuje tvorbu formantové oblasti 1,4 kHz. Směrová charakteristika je zde velmi vyrovnaná všesměrová, a to pro všechny měření.

5.4 Tón c1

Tón	C1					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	233,005	234,005	234,005	0,000	0,000	0,000
2.	466,010	467,010	467,010	-29,294	-27,815	-22,310
3.	699,015	701,015	701,015	-0,438	-2,278	-1,924
4.	932,019	934,019	934,019	-21,634	-22,433	-20,247
5.	1165,024	1167,024	1168,024	-3,446	-0,901	-9,430
6.	1398,029	1401,029	1401,029	-8,317	-2,607	-6,559
7.	1631,034	1634,034	1635,034	-12,795	-10,871	-13,414
8.	1864,039	1867,039	1868,039	-14,950	-25,793	-14,643
9.	2097,044	2104,044	2102,044	-13,650	-21,272	-20,197

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	233,005	234,005	234,005	0,000	0,000	0,000
2.	467,010	468,010	468,010	-33,677	-34,056	-35,412
3.	700,015	702,015	702,015	-6,910	-7,347	-7,677
4.	932,019	935,019	936,020	-30,043	-31,833	-31,438
5.	1165,024	1169,024	1170,024	-8,664	-11,246	-9,603
6.	1399,029	1403,029	1405,029	-11,456	-13,617	-12,669
7.	1631,034	1636,034	1639,034	-13,202	-14,088	-14,741
8.	1866,039	1870,039	1873,039	-33,524	-38,226	-23,535
9.	2096,044	2104,044	2108,044	-22,102	-24,731	-21,285

Tab. 5.4: Tabulka spektra tónu c1



Obr. 5.4: FFT a LPC tónu c1

5.4.1 Zhodnocení výsledků tónu c1

Při hře tónu g na klarinet jsou otevřeny všechny otvory na spodní části středového dílu. Rozdíl rozdílných základních frekvencí u ozvučnicku Kraslice je zde pravděpodobně způsoben odlišným nátiskem nebo teplotou nástroje. Základní frekvence s ozvučnickem Special i bez něj je stejná, už se tedy skoro neprojevuje vliv ozvučnicku na fundament. Jak si můžeme všimnout i při otevření poloviny tónových otvorů má ozvučnick pořád vliv na výslednou barvu tónu. Dřevěné nátrubky mezi sebou mají podobné vlastnosti, stejně tak plastové, ale je zde patrná odlišnost materiálu. Z toho je možno usoudit, že při otevřených tónových otvorech již nemá výsledný tvar nátrubku takový vliv na výslednou barvu tónu, jako právě materiál a jeho hustota. U plastových nátrubků jsou třetí a pátá harmonická složka méně výrazné než u nátrubků dřevěných, obecně se dá říci, že dřevěné nátrubky zde více podporují všechny vyšší harmonické složky. Z hlediska formantových oblastí lze u všech nátrubků (kromě nátrubku Kraslice) pozorovat některé z typických formantových oblastí. Ty se vyskytují v oblasti šesté harmonické složky, dále pak kolem frekvence

2,8 kHz a poslední kolem 4 kHz. Z hlediska směrové charakteristiky zde nelze pozorovat výraznější odchylky a nedá se relevantně posoudit vliv tvaru ozvučníku na tuto charakteristiku.

5.5 Tón h1

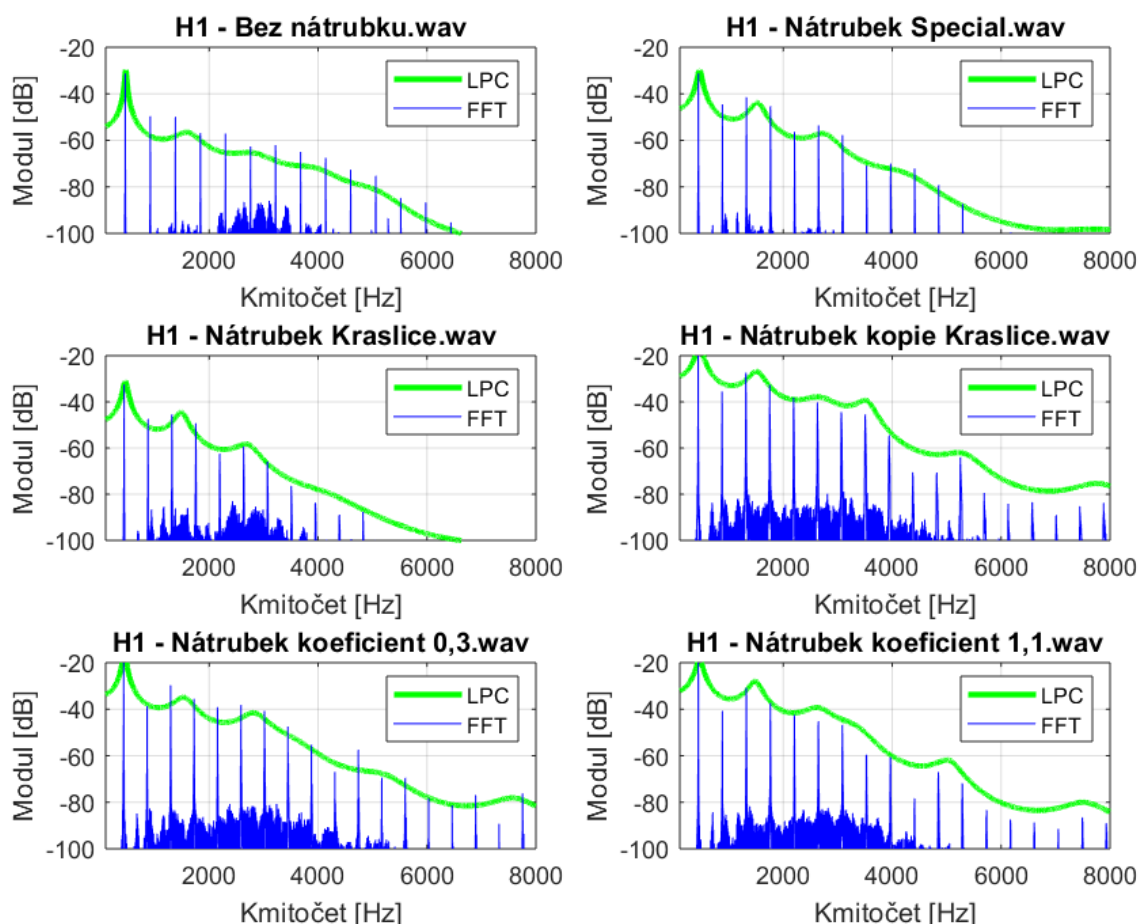
Tón	H1					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	440,009	442,009	460,010	0,000	0,000	0,000
2.	880,018	884,018	920,019	-14,922	-13,244	-18,412
3.	1321,028	1327,028	1380,029	-12,956	-10,163	-18,713
4.	1758,037	1767,037	1840,038	-16,753	-14,023	-25,606
5.	2201,046	2213,046	2300,048	-29,923	-25,095	-25,880
6.	2642,055	2651,055	2760,058	-26,850	-22,322	-31,397
7.	3082,064	3092,064	3219,067	-33,429	-26,473	-30,837
8.	3522,073	3541,074	3679,077	-43,935	-39,635	-33,710
9.	3963,083	3984,083	4139,086	-51,211	-38,750	-36,277

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	439,009	432,009	442,009	0,000	0,000	0,000
2.	880,018	863,018	883,018	-20,149	-24,034	-19,030
3.	1320,028	1295,027	1325,028	-11,089	-17,836	-10,504
4.	1754,037	1728,036	1767,037	-18,413	-22,937	-16,009
5.	2201,046	2160,045	2208,046	-22,121	-28,004	-20,409
6.	2631,055	2592,054	2650,055	-27,187	-27,489	-22,176
7.	3082,064	3024,063	3101,065	-25,571	-27,264	-26,538
8.	3522,073	3455,072	3545,074	-27,666	-34,481	-32,423
9.	3945,082	3887,081	3974,083	-37,122	-42,874	-39,884

Tab. 5.5: Tabulka spektra tónu h1

5.5.1 Zhodnocení výsledků tónu h1

Pro tón h1 platí stejný hmat, jako pro tón e s tím, že je třeba použít přefukovací klapku, díky které je velmi usnadněna změna rezonančního módu. Můžeme si zde opět všimnout velkého rozdílu ve frekvenci fundamentu bez použití ozvučníku, liší se zde až o 18 Hz. Je zde také změna při použití nátrubku $\gamma = 0,3$, ale zde se základní frekvence snižuje, což není způsobeno zkrácením akustické délky, ale spíše chybou měření - příliš povolený nátisk. Navíc zde i ostatní hodnoty vybočují z řady, takže měření tohoto ozvučníku nemůžeme považovat za směrodatné. Modul fundamentu je u všech měření velmi výrazný, připojení ozvučníku zde napomáhá modulu třetí harmonické složky, plastové ozvučníky pak podpoří více i nazálnost nástroje.



Obr. 5.5: FFT a LPC tónu h1

Ve srovnání nátrubku Kraslice a Kraslice kopie, tzn. srovnání materiálu lze vidět, že plastový nátrubek více podporuje brsknost a jasnost díky větší míře zastoupení sedmé, osmé a deváté složky, dřevo však podporuje druhou harmonickou, mohutnost. U formantových oblastí můžeme vidět podobné grafy a tři nebo čtyři formantové oblasti. První a nejsilnější podporuje mohutnost tónu v oblasti kolem 880 Hz, druhou v oblasti čtvrté a páté harmonické kolem kmitočtu 2 kHz podporující jeho nazálnost a třetí kolem sedmé harmonické složky podporující brsknost tónu. Ve směrové charakteristice můžeme opět vidět celkem konzistentní všesměrovou charakteristiku, která odpovídá zavřeným klapkám nástroje.

5.6 Tón c2

5.6.1 Zhodnocení výsledků tónu c2

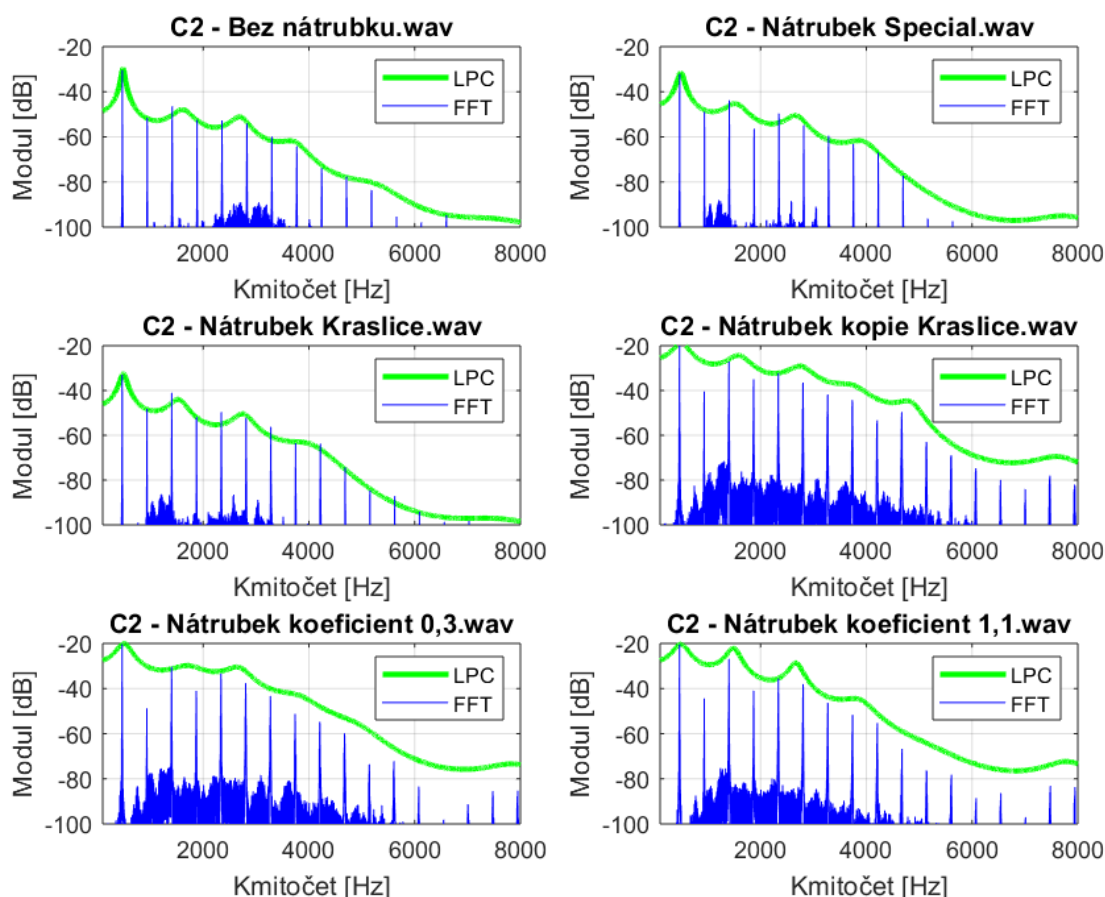
Pro tón c2 platí stejný hmat, jako pro tón f s tím, že je třeba použít přefukovací klapku, díky které je velmi usnadněna změna rezonančního módu. Stejně jako u

Tón	C2					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	469,010	470,010	472,010	0,000	0,000	0,000
2.	938,020	939,020	943,020	-15,293	-16,858	-21,172
3.	1407,029	1409,029	1415,029	-8,108	-11,693	-16,002
4.	1875,039	1878,039	1886,039	-18,961	-24,330	-22,072
5.	2343,049	2348,049	2358,049	-16,648	-17,590	-22,246
6.	2812,059	2817,059	2829,059	-19,228	-22,727	-23,661
7.	3280,068	3287,068	3301,069	-23,294	-27,433	-29,484
8.	3749,078	3756,078	3773,079	-30,598	-31,068	-33,749
9.	4217,088	4226,088	4243,088	-30,836	-34,891	-43,424

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	467,010	469,010	467,010	0,000	0,000	0,000
2.	934,019	938,020	933,019	-20,945	-24,995	-19,081
3.	1401,029	1407,029	1400,029	-5,817	-8,220	-3,053
4.	1868,039	1877,039	1866,039	-13,482	-19,702	-17,256
5.	2335,049	2346,049	2333,049	-12,385	-11,578	-13,767
6.	2802,058	2815,059	2799,058	-13,854	-17,245	-15,073
7.	3269,068	3285,068	3266,068	-18,538	-22,097	-23,040
8.	3736,078	3754,078	3733,078	-21,188	-23,994	-27,582
9.	4203,088	4223,088	4206,088	-30,895	-30,051	-32,989

Tab. 5.6: Tabulka spektra tónu c2

tónu f se zde ještě projevuje vliv připojení ozvučníku na základní frekvenci tónu. Z hlediska srovnání materiálu je opět u obou ozvučnicků vidět podpora třetí a páté harmonické složky, protože modul po jejich připojení nabývá na hodnotě, podporují tedy typický klarinetový tón a to ve větší míře, než ozvučníky dřevěné. Ve srovnání plastových nátrubků se projevila změna jejich tvaru především na třetí a čtvrté harmonické, kdy je nátrubek s větším koncovým průměrem ($\gamma = 1,1$) podpořil výrazněji. Z hlediska LPC analýzy můžeme vidět tři výrazné formantové oblasti. První se nachází kolem druhé harmonické složky a podporuje opět mohutnost tónu, druhý na třetí harmonické složce, který podporuje dutost a je vidět, že měření bez nátrubku tuto oblast nepodporuje tak výrazně. Třetí pak kolem šesté harmonické složky, kde opět posiluje jasnost tónu. Z hlediska směrové charakteristiky je opět vyzařování všesměrové.



Obr. 5.6: FFT a LPC tónu c2

5.7 Tón d2

5.7.1 Zhodnocení výsledků tónu d2

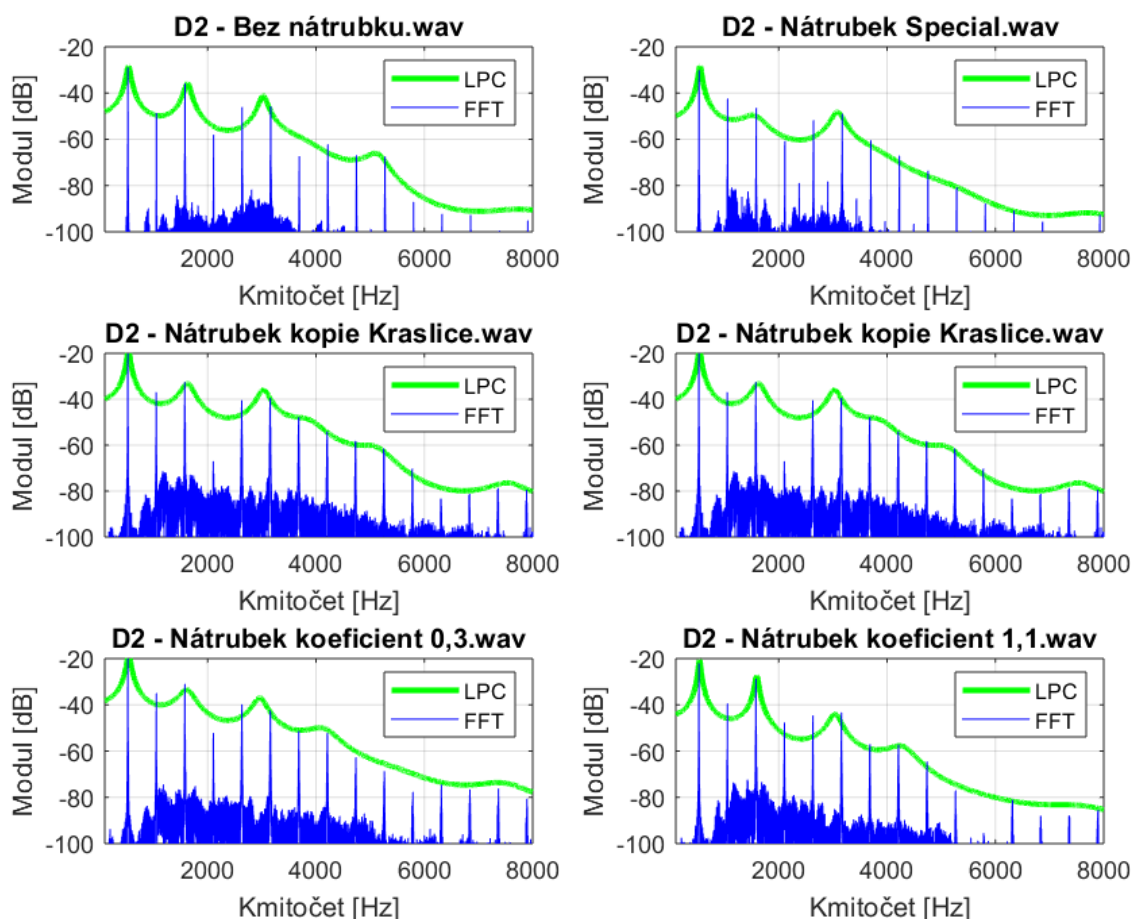
Pro tón d2 platí stejný hmat, jako pro tón g s tím, že je třeba použít přefukovací klapku, díky které je velmi usnadněna změna rezonančního módu. Vliv na základní frekvenci je již zde projeven jen mírně. Paradoxně je zde vyšší modul třetí a páté harmonické složky bez připojeného dřevěného ozvučníku, s připojením ozvučníku Special je vidět jeho výrazný pokles. Ve srovnání materiálu, tzn. mezi nátrubkem Kraslice a Kraslice kopie, je vidět výrazný pokles čtvrté harmonické složky u plastového nátrubku, jinak jsou výsledky docela vyrovnané a nejsou zde velké rozdíly. Z hlediska LPC analýzy jsou výsledky podobné jako u předchozího vzorku tónu c2. U směrové charakteristiky nepozorujeme výrazné změny oproti tónu c2, charakteristika je vesměs všesměrová.

Tón	D2					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	527,011	529,011	528,011	0,000	0,000	0,000
2.	1054,022	1058,022	1056,022	-13,501	-12,256	-19,622
3.	1581,033	1586,033	1583,033	-11,701	-16,271	-6,984
4.	2107,044	2115,044	2111,044	-28,984	-30,593	-29,076
5.	2634,055	2644,055	2639,055	-15,308	-21,629	-17,122
6.	3161,066	3172,066	3166,066	-12,865	-18,849	-16,748
7.	3688,077	3701,077	3694,077	-28,713	-30,293	-38,322
8.	4215,088	4229,088	4222,088	-31,178	-36,899	-33,213
9.	4740,099	4758,099	4749,099	-39,598	-43,434	-37,968

Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	526,011	527,011	527,011	0,000	0,000	0,000
2.	1051,022	1054,022	1054,022	-17,673	-14,870	-17,089
3.	1577,033	1580,033	1579,033	-11,966	-12,359	-8,822
4.	2102,044	2106,044	2108,044	-44,720	-35,253	-22,889
5.	2628,055	2633,055	2636,055	-18,565	-18,202	-26,909
6.	3153,066	3159,066	3163,066	-17,631	-21,384	-25,021
7.	3679,077	3686,077	3684,077	-26,705	-30,769	-35,697
8.	4204,088	4212,088	4211,088	-31,910	-32,187	-35,978
9.	4730,099	4739,099	4739,099	-36,713	-40,810	-40,815

Tab. 5.7: Tabulka spektra tónu d2

5.8 Tón c3



Obr. 5.7: FFT a LPC tónu d2

5.8.1 Zhodnocení výsledků tónu c3

Při hře tónu c3 na klarinet je zakrytý pouze spodní otvor vrchní poloviny středové části těla a stisknuta přefukovací klapka. Energie je vyzařována všemi otvory. Frekvence fundamentu je zde pravděpodobně ovlivněna únavou hráče, kdy pro tento tón je již třeba vynaložit větší sílu nátisku a plátek více přitisknout, zároveň malé změny nátisku se daleko více projeví na výsledném tónu než u tónů nižších. Tón zde již ztrácí svou charakteristickou barvu pro nižší tóny klarinetu, je velmi ostrý, převažuje sudé spektrum. Ve srovnání dřeva a plastu můžeme vidět, že plastový nátrubek více podpoří třetí harmonickou složku. Ve srovnání plastových ozvučníků jsou hodnoty celkem vyrovnané a mezi nátrubky nejsou v barvě zvuku výrazné odlišnosti. Z přiložených směrových charakteristik nelze jednoznačně určit odlišnosti mezi nátrubky.

Tón	C3					
Ozvučník	Kraslice	Special	Bez ozvučníku	Kraslice	Special	Bez ozvučníku
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	943,020	942,020	947,020	0,000	0,000	0,000
2.	1887,039	1884,039	1894,039	-2,820	-3,170	-3,649
3.	2833,059	2826,059	2841,059	-28,709	-15,270	-10,803
4.	3771,079	3768,079	3788,079	-16,930	-17,681	-21,801
5.	4714,098	4707,098	4717,098	-38,335	-50,580	-46,870
6.	5657,118	5650,118	5683,118	-45,809	-40,599	-43,479
7.	6601,138	6592,137	6629,138	-52,815	-45,278	-48,994
8.	7543,157	7533,157	7576,158	-56,071	-58,510	-65,870
9.	8433,176	8475,177	8518,177	-59,360	-53,341	-57,829

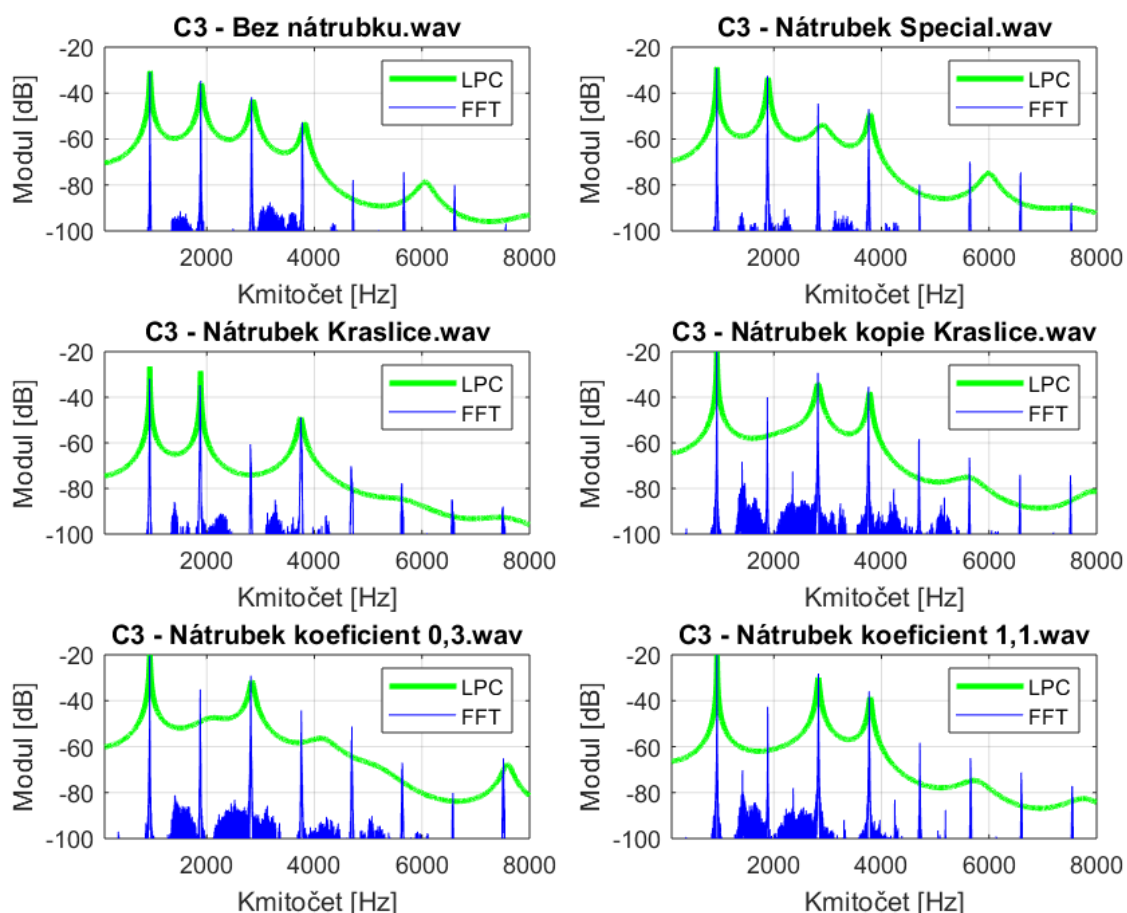
Ozvučník	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$	Kopie Kraslice	Nátrubek $\gamma = 0,3$	Nátrubek $\gamma = 1,1$
Pořadí harmonické složky	f(Hz)			Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]		
1.	940,020	941,020	945,020	0,000	0,000	0,000
2.	1881,039	1882,039	1889,039	-18,139	-14,639	-21,423
3.	2821,059	2822,059	2833,059	-8,545	-10,086	-8,898
4.	3759,078	3761,078	3778,079	-14,638	-24,027	-16,438
5.	4703,098	4709,098	4722,098	-36,361	-34,344	-38,433
6.	5643,118	5642,118	5667,118	-45,865	-46,862	-42,907
7.	6578,137	6597,137	6611,138	-52,166	-62,807	-50,573
8.	7525,157	7527,157	7556,157	-51,469	-45,596	-52,644
9.	8465,176	8480,177	8500,177	-49,203	-52,304	-54,191

Tab. 5.8: Tabulka spektra tónu c3

5.9 Celkové zhodnocení výsledků

Ozvučník klarinetu tvoří velmi důležitou součást nástroje. Pro nejnižší frekvence je důležitý už jen pro prodloužení akustické délky nástroje, ovšem má svůj význam i pro vyšší frekvence a ovlivňuje barvu tónu. Při měření v šalmajovém rejstříku se velmi výrazně projevilo snížení rezonančního módu při jeho připojení. Při spodních tónech klarinetového rejstříku pak ozvučníky napomáhaly prosazení třetí a páté harmonické složce a dotvářely tak typický klarinetový tón.

Z měření dále vyplývá, že pro tóny klarinetu v šalmajovém rejstříku ozvučníky výrazně nenapomáhají tvorbě lichých harmonických složek a výrazně tedy neovlivňují barvu tónu, ovšem stejně jsou tyto harmonické pro tyto tóny dominantní a významně převládají nad těmi sudými. V rejstříku klarinetovém, kdy z podstaty principu klarinetu začínají sudé harmonické složky zesilovat a vyrovnávat se těm lichým, začínají ozvučníky tyto liché složky podporovat a udržují tak barvu tónu.



Obr. 5.8: FFT a LPC tónu c3

Z hlediska rozdílu tvaru se můžeme nejvíce zaměřit na porovnání nátrubku Kraslice kopie a nátrubku s koeficientem $\gamma = 1,1$, jelikož jsou to nátrubky vyrobeny ze stejného tvaru, avšak výrazně se odlišují svým tvarem. Nátrubek $\gamma = 1,1$ s větším koncovým průměrem v šalmajovém rejstříku téměř vždy více podporoval právě liché harmonické složky. U suchých složek byly výsledky proměnné a nelze je jednoznačně určit.

Z hlediska rozdílu materiálu je ideální porovnat hodnoty pro nátrubek Kraslice a jeho kopii. Tyto nátrubky jsou jako jediné tvarově identické. Pro nízké tóny šalmajového rejstříku, kdy je většina tónových klapků zavřena, podporoval dřevěný nátrubek liché harmonické složky více než jeho plastová kopie, v rejstříku klarinetovém se už hodnoty různí nebo jsou si podobné a změna materiálu zde neznamena velkou změnu v barvě tónu.

Z hlediska směrové charakteristiky se neprojevovaly velké změny při použití rozdílných nátrubků.

Závěr

V bakalářské práci jsem uceleně sepsal vývoj klarinetu, přiblížil jsem jeho konstrukci a detailně popsal každou z jeho částí. Také jsem popsal princip vzniku tónu tohoto nástroje a jeho ovlivňující faktory.

Další částí bylo samotné měření. Nejprve proběhlo mechanické měření ozvučníků, které bylo přeneseno do grafů. Následoval výběr vhodných tónů a měření jejich frekvenčního spektra a směrových charakteristik v bezodrazové komoře, kde byly získány potřebné data pro další práci.

Poté jsem se věnoval harmonické analýze signálu, přepracoval potřebné skripty směrové charakteristiky, lineární prediktivní analýzy a Fourierovy transformace. Pomocí těchto skriptů jsem v prostředí MATLAB vygeneroval příslušné charakteristiky, grafy a jejich hodnoty, které jsem přehledně zaznamenal do tabulek a vyhodnotil.

Na základě Besselových zvukovodů jsem navrhl tři různé nátrubky a to tak, aby se výrazně odlišovaly svým tvarem či použitým materiálem a mohl jsem co nejlépe určit jejich vliv na výsledný zvuk klarinetu. Tyto nátrubky byly vytištěny na 3D tiskárně z ABS plastu a bylo provedeno opakované měření.

Výsledky tohoto měření jsem opět zpracoval a porovnal všechna naměřená data. Bohužel se ukázalo, že ani přes snahu vyrobit velmi odlišné ozvučníky, se na výsledcích tyto změny významně neprojeví a nelze jednoznačně určit jejich dopady. Je důležité si uvědomit, že měření ovlivňovalo několik faktorů a to především nestálý nátlak hráče, který významně ovlivní nejen základní frekvenci tónu, ale i jeho barvu.

Literatura

- [1] *Klarsax*. Brno, 2019. URL: <https://http://www.klarsax.wz.cz/>.
- [2] Václav Syrový. *Hudební akustika*. Akademie muzických umění v Praze, Praha, 2013.
- [3] *Clarina Music*. Brno, 2019. URL: <https://www.clarina.cz/>.
- [4] *Wikipedia*. Brno, 2019. URL: <https://www.wikipedia.org/>.
- [5] Michaela Kopytková. *Klarinet a technika hry na klarinet s přihlédnutím na život a dílo B. H. Crusella*. PhD thesis, Univerzita Palackého v Olomouci, Pedagogická Fakulta, 2009.
- [6] Řezníček Jan. *Vliv hubičky, plátku a ligatury na charakteristiku klarinetového tónu*. PhD thesis, Konzervatoř v Pardubicích, 2002.
- [7] Tomáš Suchánek. *Analýza spektra klarinetů od různých výrobců*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019.
- [8] Alistair C.P. Braden. *Bore Optimisation and Impedance Modelling of Brass Musical Instruments*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2006.
- [9] doc. Ing. Jiří Mišurec. *Základní metody číslicového zpracování signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [10] *Malujeme barvy ekvalizérem*, 2019. URL: <https://magazin.disk.cz/>.
- [11] Pavel Hoffman. *Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019.
- [12] *Audix Microphones*. United States of America, 2019. URL: <https://audixusa.com/>.
- [13] *Brüel&Kjaer*. United States of America, 2019. URL: <https://www.bksv.com/>.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

DFT	Diskrétní Fourierova transformace
LPC	Lineární prediktivní kódování
FFT	Rychlá Fourierova transformace
DAW	Digital Audio Workstation - prostředí k editaci, mixáži a masteringu zvukových stop
VUT	Vysoké učení technické
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren

Seznam příloh

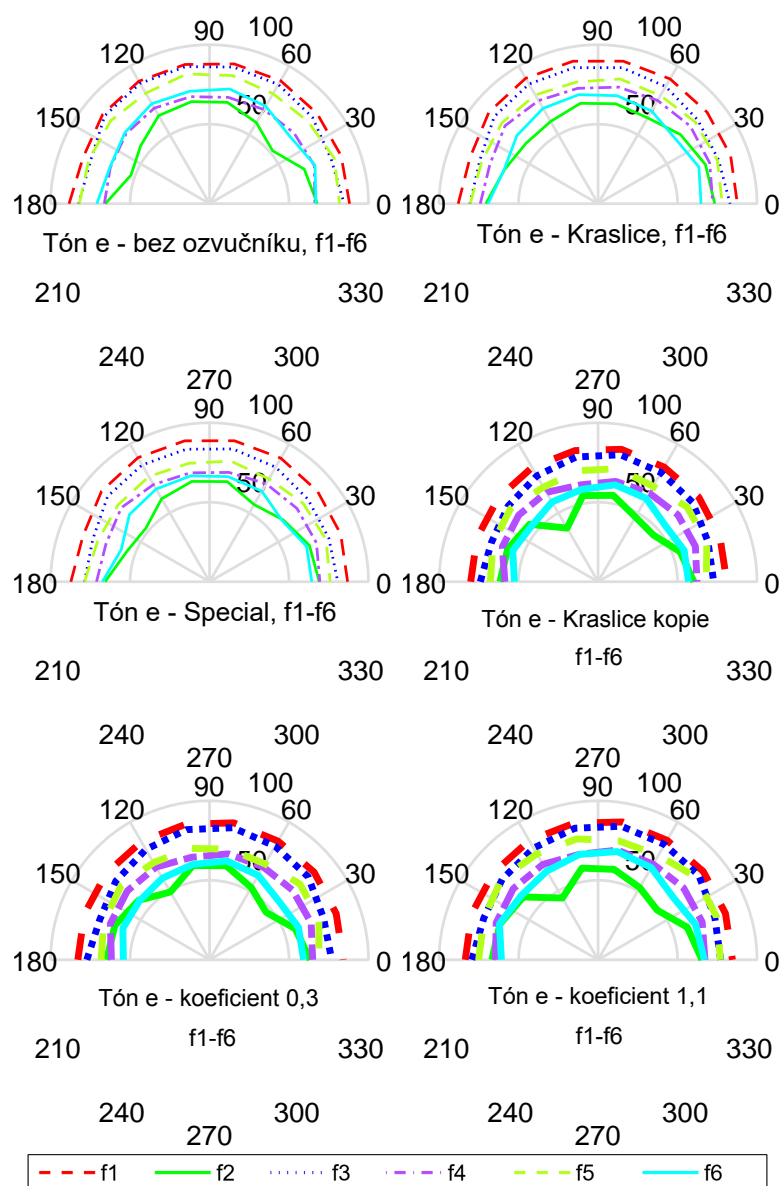
A	Přiložené CD	54
B	Směrové charakteristiky	55

A Přiložené CD

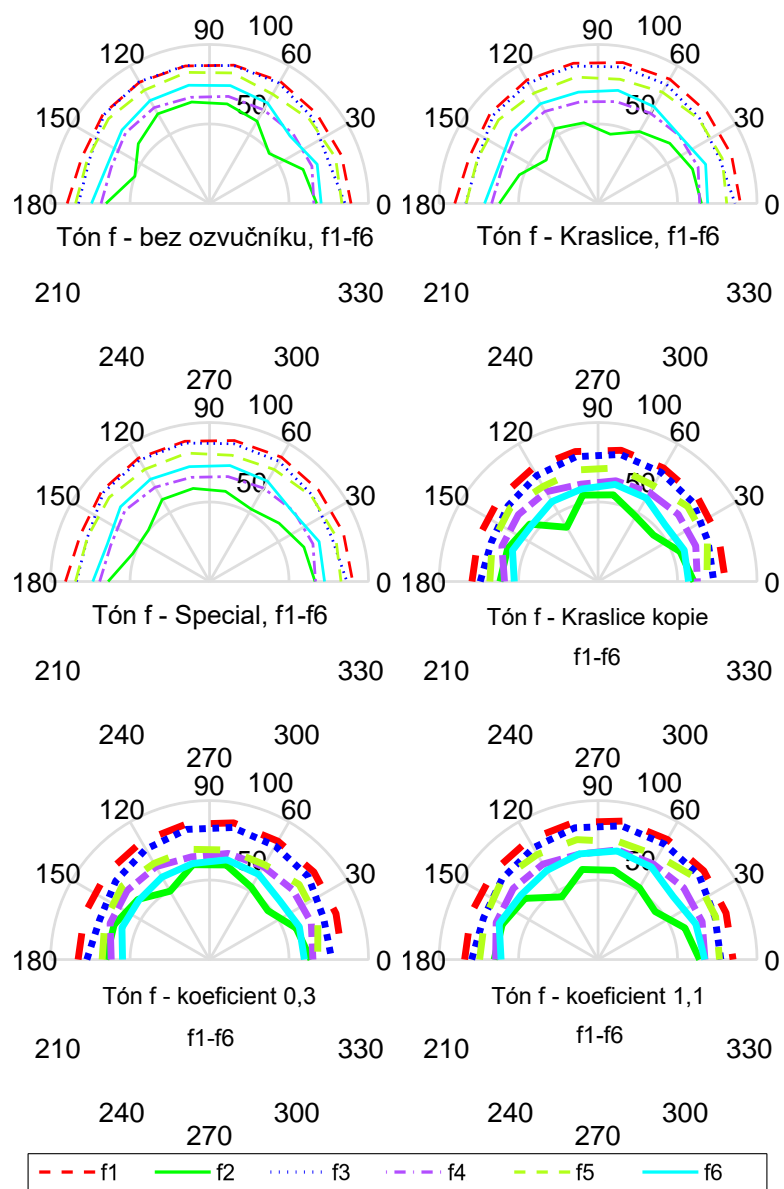
CD obsahuje:

- Naměřené vzorky ve složce ./Vzorky
- Programy z prostředí Matlab ve složce ./Matlab
- Grafy, tabulky a obrázky ve složce ./Grafy, tabulky a obrázky

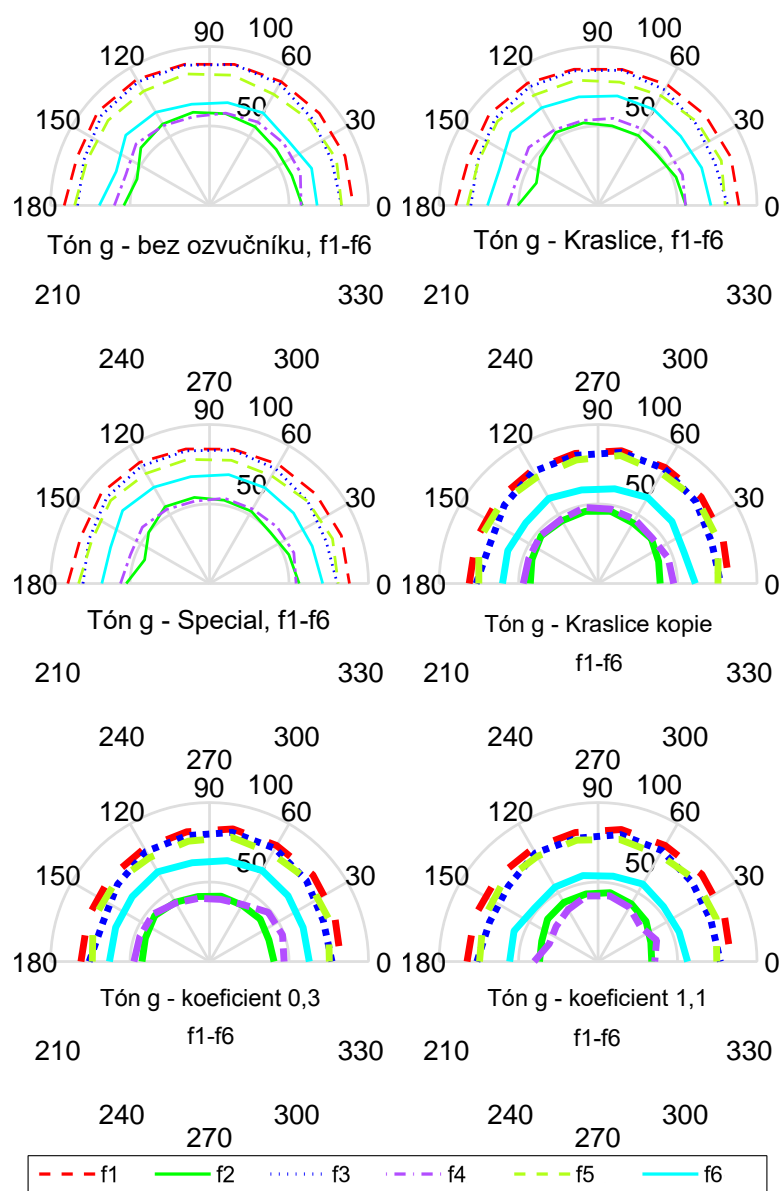
B Směrové charakteristiky



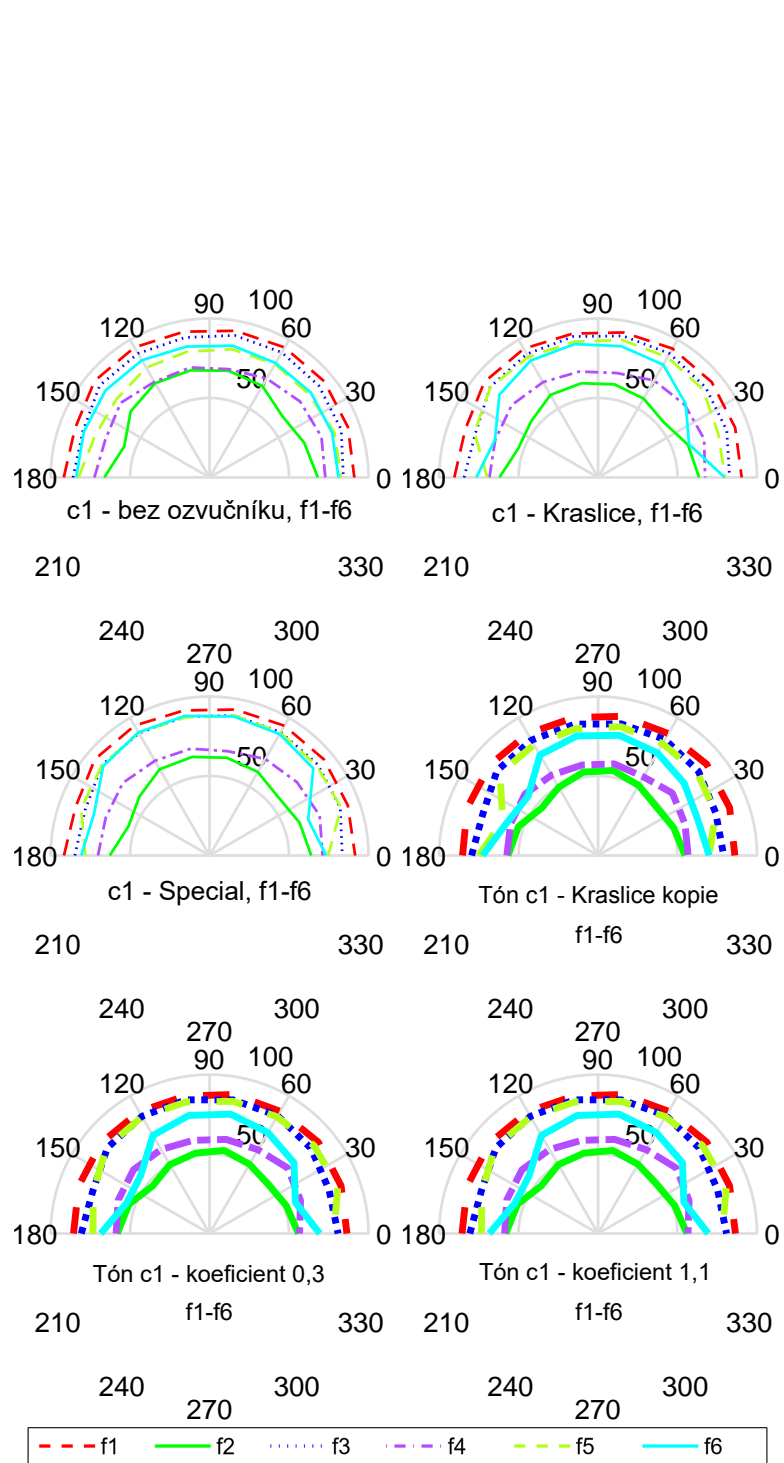
Obr. B.1: Směrové chrakteristiky tónu e



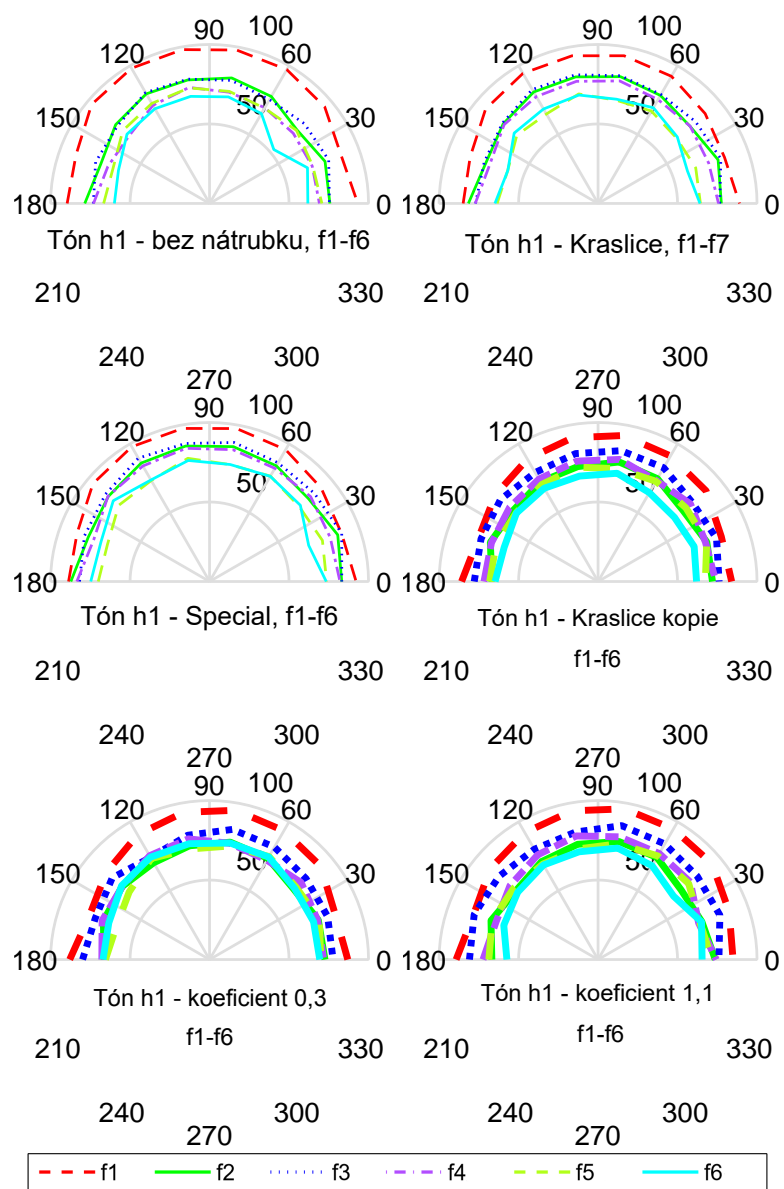
Obr. B.2: Směrové charakteristiky tónu f



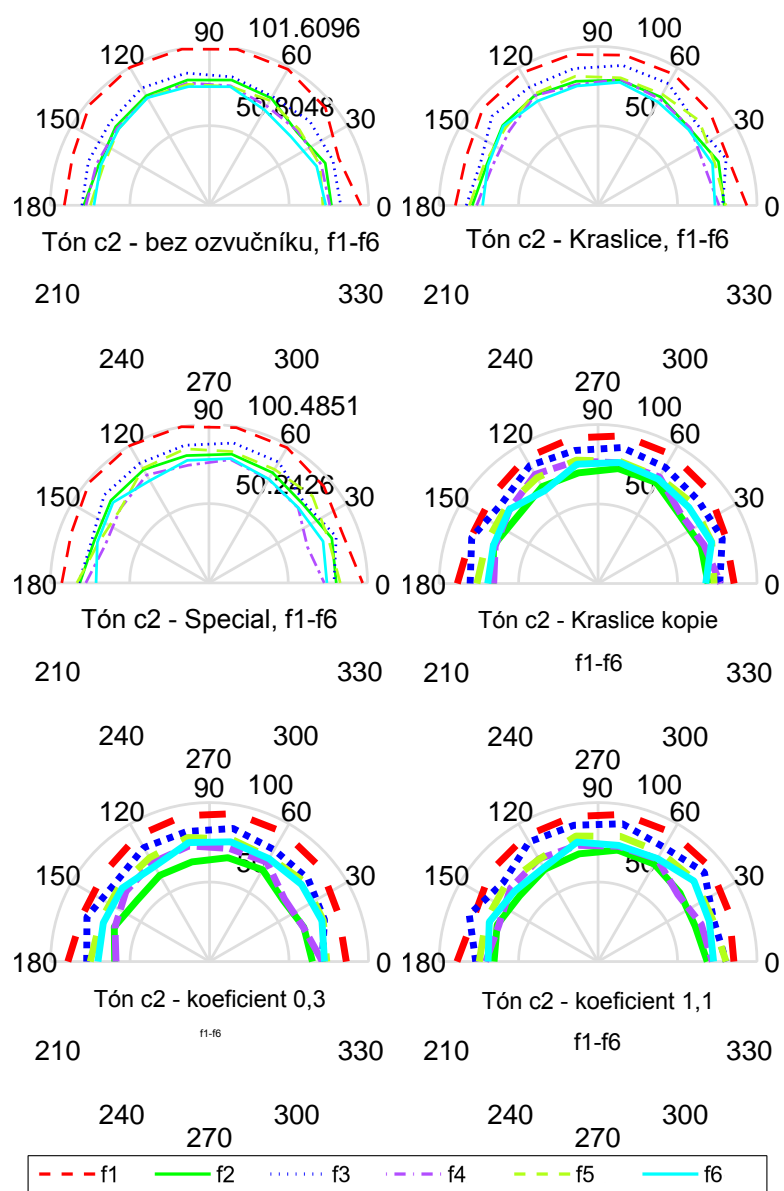
Obr. B.3: Směrové charakteristiky tónu g



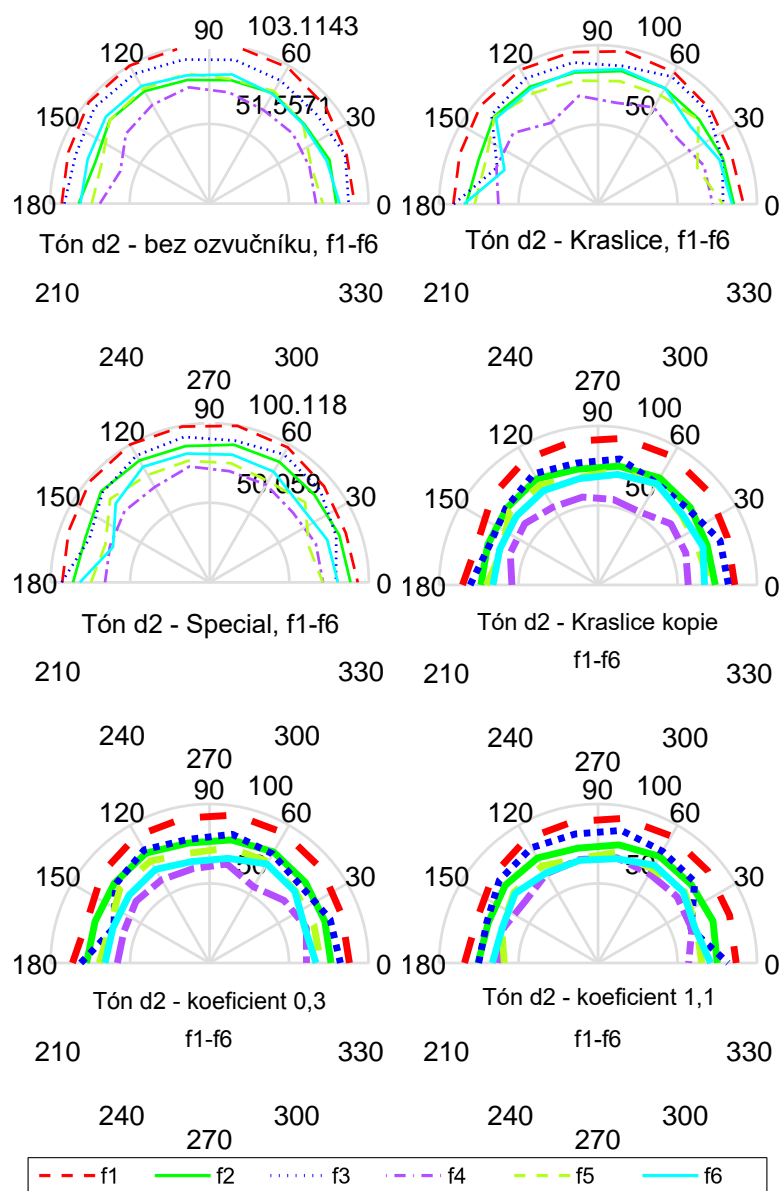
Obr. B.4: Směrové charakteristiky tónu c1



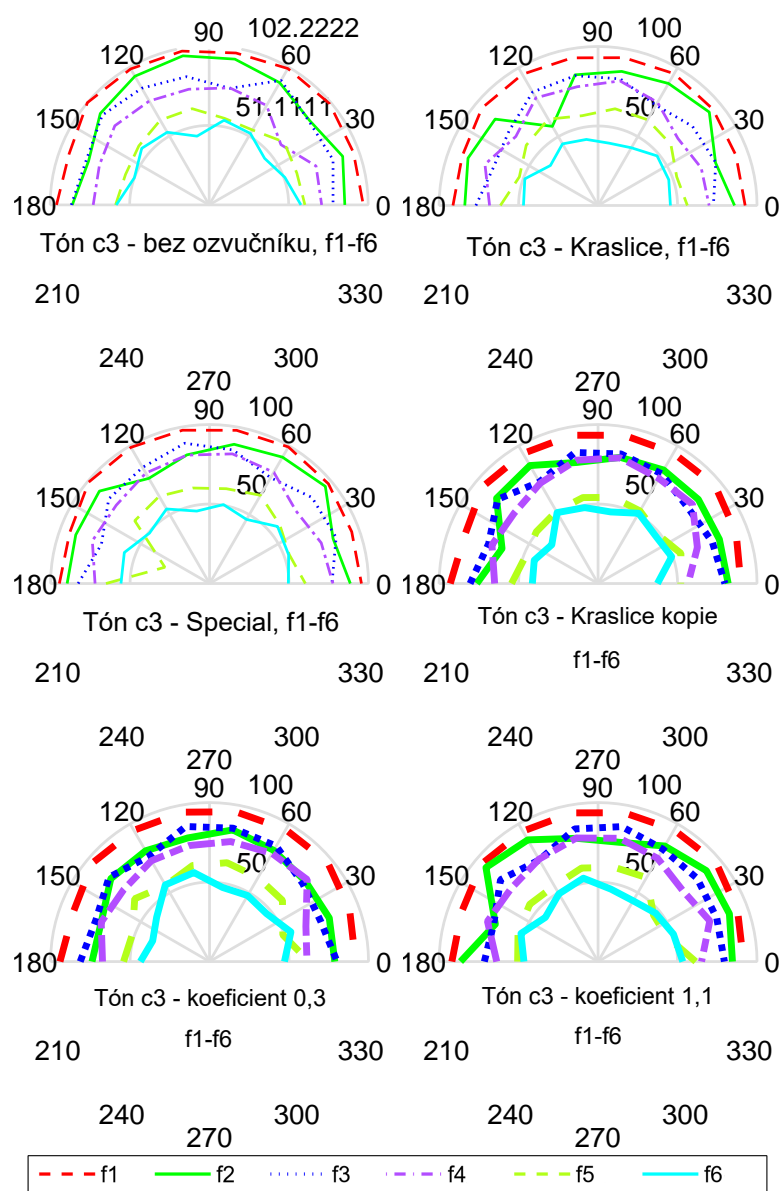
Obr. B.5: Směrové charakteristiky tónu h1



Obr. B.6: Směrové charakteristiky tónu c2



Obr. B.7: Směrové charakteristiky tónu d2



Obr. B.8: Směrové charakteristiky tónu c3